

**DER PORENRAUM UND DIE PERMEABILITÄT  
OBERFRÄNKISCHER SANDSTEINE**

Albert Dobner

1975





Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41551925\\_0035](https://archive.org/details/IA41551925_0035)



DER PORENRAUM UND DIE PERMEABILITÄT  
OBERFRÄNKISCHER SANDSTEINE

INAUGURAL - DISSERTATION ZUR ERLANGUNG DES DOKTORGRADES  
DES FACHBEREICHES GEOWISSENSCHAFTEN  
DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN



VORGELEGT VON  
ALBERT DOBNER  
ROHR

MÜNCHEN, JANUAR 1975

1. Berichterstatter: Prof. Dr. W.-D. GRIMM
  2. Berichterstatter: Prof. Dr. K. SCHMIDT
- Tag der mündlichen Prüfung: 13.3.1975



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

|                                                                  | <u>Seite</u> |
|------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1. <u>Einleitung</u>                                             | 1            |
| 2. <u>Der oberfränkische Grenzkarneolhorizont</u>                | 2            |
| 2.1 Geologischer Überblick                                       | 2            |
| 2.2 Zur stratigraphischen Stellung des Horizontes                | 4            |
| 2.3 Der Horizont im Gelände                                      | 6            |
| 2.4 Der Horizont in der Bohrung Mürsbach                         | 9            |
| 3. <u>Petrographische Untersuchungen</u>                         | 11           |
| 3.1 Kornverteilung                                               | 11           |
| 3.2 Kornrundung                                                  | 20           |
| 3.3 Korneinregelung                                              | 21           |
| 3.4 Schichtung                                                   | 22           |
| 3.5 Quarzanteil                                                  | 23           |
| 3.6 Diagenetische Veränderungen                                  | 26           |
| 3.7 Porengeometrie und Porenentstehung                           | 29           |
| 3.8 Porenverteilung                                              | 33           |
| 4. <u>Gesteinsphysikalische Untersuchungen</u>                   | 34           |
| 4.1 Porosität                                                    | 34           |
| 4.2 Porenradienverteilung                                        | 44           |
| 4.3 Permeabilität                                                | 52           |
| 4.3.1 Die Bestimmung der absoluten Permeabilität                 | 55           |
| 4.3.2 Einfluß der Gleitströmung                                  | 56           |
| 4.3.3 Einfluß der Turbulenz                                      | 59           |
| 4.3.4 Kurzbeschreibung der Meßapparatur für Luft                 | 60           |
| 4.3.5 Meßvorgang                                                 | 60           |
| 4.3.6 Darstellung der Meßwerte                                   | 61           |
| 4.3.7 Abhängigkeit der absoluten Permeabilität von der Porosität | 67           |
| 4.4 Permeabilität für Wasser                                     | 69           |
| 4.5 Permeabilitätsanisotropie                                    | 72           |
| 4.6 Die Strömung des Wassers in den Poren                        | 75           |
| 4.6.1 Beziehung Wasser-Sediment                                  | 76           |
| 4.6.2 Wirksamer Porenradius                                      | 81           |
| 5. <u>Zusammenfassung</u>                                        | 84           |

Literaturverzeichnis

Anhang



## Vorwort

Im Rahmen der hydrogeologischen und sedimentpetrographischen Untersuchungen, die unter der Leitung von Herrn Prof.Dr.W.-D.GRIMM am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München durchgeführt werden, soll in dieser Arbeit die Abhängigkeit der Porosität und Permeabilität von petrographischen Eigenschaften der Gesteine näher untersucht werden.

Auf Anregung von Herrn Dr.H.GUDDEN, Bayerisches Geologisches Landesamt München wurde dafür der oberfränkische Grenzkarneolhorizont ausgewählt. Herrn Professor GRIMM danke ich für die vorbildliche Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit, ebenso Herrn Professor Dr.-Ing.A.MAUCHER für die Überlassung eines Arbeitsplatzes.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Physiker K.TIETZE, Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover, für die anregende Diskussion und gute Zusammenarbeit.

Für ihre Unterstützung danke ich weiterhin Herrn Dr.P.HEROLD vom Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie, Herrn Dr.P.UDLUFT und seinen Mitarbeitern Herrn Dipl.-Geol. J.BITTERSOHL und Herrn Dipl.-Geol.P.SCHMITT vom Institut für Wasserchemie der TU München, sowie Herrn Dipl.-Min. W.LINDHUBER vom Institut für Mineralogie und Petrographie der Universität München.

Weiter bin ich allen zu Dank verpflichtet, die durch ihre Hilfe zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.



# Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

| <u>Symbol</u>  | <u>Dimension</u>  | <u>Erklärung</u>                                                                                  |
|----------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A              | -                 | Menge                                                                                             |
| a              | -                 | Konstante                                                                                         |
| a <sub>s</sub> | m                 | Schichtdicke des hygroscopisch gebundenen Wassers                                                 |
| $\alpha$       | o                 | Randwinkel                                                                                        |
| $\eta$         | cP                | dynamische Viskosität<br>(neue empfohlene Einheit nach DIN 1342<br>mPas.s, Milli-Pascal-Sekunden) |
| b              | -                 | Konstante                                                                                         |
| b <sub>f</sub> | -                 | Proportionalitätsfaktor                                                                           |
| C              | -                 | Konstante                                                                                         |
| d <sub>a</sub> | mm                | Korndurchmesser bei einem bestimmten Prozentanteil ("Perzentilwert")                              |
| $\vartheta$    | o                 | Glanzwinkel                                                                                       |
| $\epsilon$     | -                 | Porenziffer                                                                                       |
| F              | cm <sup>2</sup>   | Querschnittsfläche                                                                                |
| F <sub>p</sub> | -                 | Hilfsfaktor                                                                                       |
| G <sup>p</sup> | g                 | Gewicht                                                                                           |
| g              | cm/s <sup>2</sup> | Erdbeschleunigung                                                                                 |
| k              | cm/s              | Durchlässigkeitsbeiwert<br>(in der Hydrogeologie auch m/s)                                        |
| K <sub>F</sub> | d=Darcy           | Durchlässigkeit (absolut)                                                                         |
| K <sub>L</sub> | d                 | Durchlässigkeit für Luft                                                                          |
| K <sub>w</sub> | d                 | Durchlässigkeit für Wasser                                                                        |
| l              | cm                | Länge                                                                                             |
| $\lambda$      | cm                | mittlere freie Weglänge der Moleküle                                                              |
| J              | -                 | Gefälle                                                                                           |
| m              | -                 | Exponent                                                                                          |
| m <sub>g</sub> | g                 | Molekulargewicht                                                                                  |
| M              | mm                | Medianwert                                                                                        |
| n              | %                 | Porosität (korrigiert)                                                                            |
| n <sub>M</sub> | %                 | Porosität (gemessen)                                                                              |

| <u>Symbol</u> | <u>Dimension</u>       | <u>Erklärung</u>                               |
|---------------|------------------------|------------------------------------------------|
| $\nu$         | $\text{cm}^2/\text{s}$ | kinematische Viskosität                        |
| $p$           | atm                    | Druck (1 atm=1,0133 bar)                       |
| $p_1; p_2$    | atm                    | Druck vor bzw. hinter dem Kern                 |
| $\bar{p}$     | atm                    | Druck im Mittelpunkt des Kerns                 |
| $Q$           | $\text{cm}^3/\text{s}$ | Durchflußmenge pro Zeit                        |
| $Re$          | -                      | Reynolds-Zahl                                  |
| $r$           | cm                     | Radius                                         |
| $\rho$        | $\text{g}/\text{cm}^3$ | Dichte                                         |
| $S_o$         | -                      | Sortierungsgrad                                |
| $S_X$         | -                      | Steilheit                                      |
| $\sigma$      | $\text{dyn}/\text{cm}$ | Oberflächenspannung                            |
| $\sigma_s$    | -                      | Standardabweichung                             |
| $t$           | s                      | Zeit                                           |
| $u$           | $\text{cm}/\text{s}$   | mittlere Geschwindigkeit der Moleküle          |
| $U$           | -                      | Ungleichförmigkeitsgrad                        |
| $v$           | $\text{cm}/\text{s}$   | Geschwindigkeit                                |
| $v_m$         | $\text{cm}/\text{s}$   | mittlere Geschwindigkeit                       |
| $v_{\max}$    | $\text{cm}/\text{s}$   | maximale Geschwindigkeit                       |
| $v_f$         | $\text{cm}/\text{s}$   | Filtergeschwindigkeit                          |
| $V_p$         | $\text{cm}^3$          | Volumen der Poren                              |
| $V_B$         | $\text{cm}^3$          | Volumen des Gesteins mit Poren                 |
| $V_{F30}$     | $\text{cm}^3$          | Referenzvolumen bei 30 $\text{cm}^3$           |
| $V_{F40}$     | $\text{cm}^3$          | Referenzvolumen bei 40 $\text{cm}^3$           |
| $V_F'$        | $\text{cm}^3$          | Referenzvolumen mit Probe bei 40 $\text{cm}^3$ |
| $V_G$         | $\text{cm}^3$          | Volumen des Gesteins ohne Poren                |
| $V_{Hg}$      | $\text{cm}^3$          | gesamtes Nachstellvolumen                      |
| $(V_{Hg})_v$  | $\text{cm}^3$          | Druck-Volumenkorrektur                         |
| $(V_{Hg})_a$  | $\text{cm}^3$          | Anlegekorrektur                                |
| $(V_{Hg})_e$  | $\text{cm}^3$          | Eindringvolumen                                |
| $\xi$         | o                      | relativierendes Korngrößenmaß                  |

## 1. Einleitung

Zur Ermittlung des Hohlraumgefüges von Gesteinen und deren Durchlässigkeit für Flüssigkeiten und Gase liegen speziell in den Bereichen der Erdölgeologie und der Hydrologie zahlreiche Detailuntersuchungen vor. Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Zusammenhänge zwischen Petrographie und gesteinsphysikalischen Größen an Hand eines verbreiteten geologischen Horizonts dargestellt werden. Fazielle Entwicklungen und diagenetische Veränderungen im Gestein sind verantwortlich für Permeabilität, Porosität und Porenverteilung, die innerseits mit physikalischen Messvorgängen bestimmbar sind. Wir erhalten Kennwerte und statistisches Material, das die vom kartierenden Geologen erfaßbaren Tendenzen zahlenmäßig belegt und erweitert. Dabei war es erforderlich, einen Vergleich der verschiedenen Methoden, Begriffe und Meßergebnisse durchzuführen.

Als Untersuchungsobjekt wurde der oberfränkische Grenzkarneolhorizont im Gebiet um Kulmbach und Kronach gewählt, der dort an der Oberfläche ausstreicht. Aus Kernmaterial der selben Schicht, die in den Bohrungen bei Mürsbach (20 km N von Bamberg) um 640 m Teufe angetroffen wird, konnten Vergleichswerte gewonnen werden.

In Ergänzung zu den Proben aus diesem Horizont wurden aus dem Mittleren Buntsandstein und dem Mittleren und Unteren Keuper des Rhön-Haßberge-Gebietes weitere Proben entnommen. An ihnen wurden in Zusammenarbeit mit den Dipl.-Geol. BITTERSOHL und SCHMITT weitere Permeabilitäts- und Porositätsmessungen durchgeführt.

## 2. Der oberfränkische Grenzkarneolhorizont

### 2.1 Geologischer Überblick

Der Buntsandstein Oberfrankens, aus dem als Untersuchungsobjekt der Grenzkarneolhorizont herausgegriffen wurde, bildet die Fortsetzung der Oberpfälzer Bucht nach Nordwesten. Das langgestreckte Sedimentationsbecken wurde im Westen und Süden von der Nürnberger Schwelle und dem Vindelizischen Rücken, im Osten von der Böhmisches Masse begrenzt. Nach Nordwesten ist es gegen das hessische und norddeutsche Buntsandsteinbecken geöffnet. Als Liefergebiet für die Sedimente kommt hauptsächlich die Böhmisches Masse in Frage. Inwieweit auch das Vindelizische Hoch daran Anteil hat, konnte noch nicht eindeutig geklärt werden.

Geologisch und sedimentpetrographisch bearbeitet wurde dieses Gebiet vor allem von KAUTZSCH 1933, REUL 1953, STEINLEIN 1953, GUDDEN 1955, GAWLIK 1955, SCHREIBER 1956, SCHNITZER 1957, EMMERT & WEINELT 1962, TRUSHEIM 1963, SCHRÖDER 1965.



Abb.1 Geographische Übersicht  
und Korngrößenverteilungsfelder

## 2.2 Zur stratigraphischen Stellung des Grenzkarneolhorizontes

Versucht man, den oberfränkischen Grenzkarneolhorizont in die überregionale Gliederung des Buntsandsteins einzuordnen, stößt man schon in der älteren wie auch noch in der neueren Literatur auf verschiedene Auffassungen. Diese Schwierigkeiten resultieren einmal aus der Randlage des oberfränkischen Buntsandsteins zum norddeutschen Becken, zum anderen daraus, daß die Schüttungsfächer von der Böhmisches Masse auf den heutigen oberflächlichen Ausbiß fast senkrecht auftreffen (KAUTZSCH 1933).

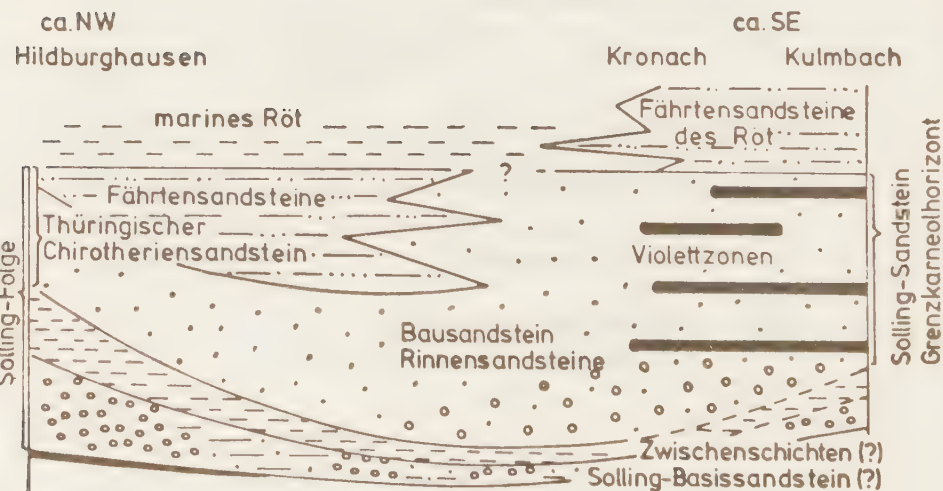


Abb.2 Faziesschema des Solling-Sandsteins zwischen Hildburghausen (Thür.) und Kulmbach (Ofr.) nach LEITZ

Dadurch sind Aussagen zur lithofaziellen Entwicklung von Süden nach Norden kaum möglich. Noch problematischer wird es im hessischen Raum, wo sich die Schüttungen von Südwest mit denen von Ost und Südost verzahnen. Nach neuesten Untersuchungen im oberfränkischen Raum (LEITZ 1974) dürfte feststehen, daß dieser Horizont mit großer Wahrscheinlichkeit mit einem Teil der Solling-Folge zu parallelisieren ist. Nach LEPPER (freundl.mündl. Mitteilung) entspricht dieser Horizont dem Thüringischen Chirotheriensandstein in Thüringen. Zusammenfassend werden die verschiedenen Meinungen über den Vergleich von Becken- und Randfazies von HERMANN (1962), TRUSCHKEIM (1963) und LEPPER (1970) beschrieben und dargestellt. Von den Bearbeitern des oberfränkischen Buntsandsteins (GUDDEN 1955, EMMERT & WEINELT 1962) wird aus lithologischen Gründen dieser Horizont zum Oberen Buntsandstein gerechnet. Um die einzelnen Abfolgen im gesamten Buntsandstein miteinander korrelieren zu können, hat sich in letzter Zeit die Ansicht durchgesetzt, daß die Sollingfolge noch zum Mittleren Buntsandstein zu rechnen ist (Manuskript der Buntsandsteinkommission 1971).

### 2.3 Der Horizont im Gelände

Literaturstudien und eigene Beobachtungen ergaben, daß sich die violette Grenzzone, die von LEPPER (1970) und anderen in Hessen und Nordwest-Bayern als scharfe Grenze zwischen der Hardeggen- und Sollingfolge beschrieben wird, und als Sedimentationslücke und als ehemalige Bodenbildung angesehen wird und weiter ostwärts im Grenzkarneolhorizont in mehrere derartige Zonen aufspaltet (LEITZ, freundliche mündliche Mitteilung). Die Karneolbildungen und die Verkieselung in diesem Horizont können mit rezenten Krustenbildungen in ariden und semiariden Gebieten verglichen werden (E.KAISER 1926).

Diese Erscheinung läßt darauf schließen, daß - während einer Sedimentationspause im Beckenbereich - am Westrand der Böhmisches Masse in zeitlichen Abständen Schuttströme austraten und sich in einer darauffolgenden Stillstandsphase ein Karneolhorizont ausbildeten (Abb. 2); dabei konnten sich auch Bodenzonen ausbilden. Nach UDLUFT (freundl. mündl. Mitteilung) füllten diese Sandfächer bereits ein Relief auf und griffen teilweise erosiv in ältere Schichten ein. So ist es auch erklärlich, daß auch ältere Schichten von der Karneolisierung erfaßt wurden (STEINLEIN 1953). Über diesem Horizont treten vereinzelt Karneolbildungen noch im unteren Teil des Oberen Buntsandsteins immer wieder auf. Dies zeigt ein Abklingen der Bildungsbedingungen von derartigen Horizonten über beträchtliche Zeiträume an.

Im Untersuchungsgebiet wurden 3 Aufschlüsse (s. Abb. 1) ausgewählt und sedimentpetrographisch untersucht. Als Beispiel für die Ausbildung im Gelände entspricht der Steinbruch bei Gehülz den im NW verbreiteten Aufschlüssen. Der Aufschluß bei Kulmbach steht stellvertretend für die Aufschlüsse im SO des Arbeitsgebietes.

Wie bei allen untersuchten Aufschlüssen, handelt es sich auch in Gehülz um einen aufgelassenen Steinbruch.

Dicke Banklagen (bis 3 m) kennzeichnen das Aufschlußbild, die teilweise aufspalten und in Wechsellagen von absandenden und harten Partien übergehen. Lockere Lagerung beschränkt sich meist auf die intensiv schräg geschichteten Bereiche, bedingt durch lagige Sortierung und Schluffeinlagerungen. Die einzelnen Schüttungskörper erreichen eine Dicke von wenigen cm bis mehreren dm. Sie weisen eine Länge von 1 - 2 m auf. Intensive Kreuzschichtung konnte an verschiedenen Stellen beobachtet werden. Die Farbe der Sandsteine ist graugelb bis grau, teilweise auch rötlich verfärbt. Im obersten Teil fällt eine Schicht mit starker Eisen-Manganpunktierung auf. Gegen die Aufschlußbasis nimmt die Zahl grüner linsenförmiger Toneinlagerungen zu, die bis 20 cm Durchmesser erreichen können. Oft deuten große Löcher in der Aufschlußwand noch auf derartige Tongerölle hin. Der Sandstein bleibt über den gesamten Aufschluß gleichmäßig feinkörnig. Die Hauptklüftung streicht NNW und ihre Kluftabstände liegen bei 20 bis 80 cm. Darauf senkrecht steht eine Nebenkluftung, deren Kluftabstände mehrere Meter betragen. Die Kluftweiten schwanken von 1 mm bis 1,5 cm im oberen Teil und vergrößern sich an der Aufschlußbasis bis auf mehrere cm.

Im Gegensatz zum Steinbruch bei Gehülz ist der Aufschluß bei Kulmbach mehr in einzelne Bänke gegliedert, die nur eine Mächtigkeit von durchschnittlich 50 - 80 cm aufweisen und sich auch im Sedimentcharakter deutlich unterscheiden. Grobsandige Lagen wechseln mit feinsandigen Partien ab, auch einzelne Schlufflagen sind zwischengeschaltet. In den mürben Lagen, die intensiv schräg geschichtet sind, finden sich Karneole, Quarzdrusen und bevorzugt Tongerölle.

Absandende Partien, die Hohlkehlen bilden, treten bevorzugt im Grobsandbereich des Aufschlusses auf. Die Sandsteine sind hellrot bis intensiv dunkelrot gefärbt. In den Kluftweiten und Kluftabständen zeigen die Aufschlüsse bei Gehülz und Kulmbach große Ähnlichkeit.



Abb.3

Aufschluß Gehülz  
(schematisch, Höhe ca.10m)



Abb.4 Aufschluß Kulmbach  
(schematisch, Höhe ca.10,5m)

## 2.4 Der Grenzkarneolhorizont in den Bohrungen bei Mürsbach

Auf der Suche nach einem Untertagegasspeicher wurden von der Firma Ruhrgas AG Essen bei Mürsbach ca. 20 km nördlich von Bamberg 5 Versuchsbohrungen niedergebracht.

Leider konnten mir nur 4 Proben aus der Bohrung Mürsbach I neben einigen wenigen Messwerten aus dem selben Horizont aus den Bohrungen Mürsbach I und III zur Verfügung gestellt werden.

Der Grenzkarneolhorizont wird in der Bohrung I von 636 m - 645 m unter Gelände angetroffen und enthält 3 Karneolhorizonte (freundl. Mitteilung von Herrn Dr. ERHARD). Die 4 untersuchten Proben entstammen einer Teufe von 640,7 m - 641,4 m und zeigen sowohl in den Dünnschliffen wie in der Kornsummenkurve Unterschiede. Die einzelnen Messwerte sind in den entsprechenden Diagrammen (Abb. 17 u 27) eingezeichnet.

Der Sandstein ist fein-bis mittelkörnig (Abb. 11) und besteht hauptsächlich aus Quarz und 10 - 20 % Feldspat. Das Bindemittel ist vor allem Anhydrit (ca. 10 %) und etwas Dolomit (ca. 1 %). Authigene Quarze sind des öfteren zu beobachten; teilweise bilden sie idiomorphe Kristalle (Tafel I, Abb. 1). Unter dem Elektronenmikroskop zeigen sich häufig schuppen- und blättchenförmige Aufwachsungen hauptsächlich von Illit, die die Körner saumförmig umgeben. Die Porosität ist vornehmlich auf kleine Poren in der Intergranularsubstanz beschränkt. Daneben sind aber auch Auslaugungen an Feldspäten und kleine Kavernenbildungen zu beobachten.

Die Werte sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 1

| Probe                 | Teufe           | $K_F$ [md] | $n_a$ [%]  | M [mm] | U   |
|-----------------------|-----------------|------------|------------|--------|-----|
| I                     | 640,75-640,84 m | 45         | 19,5       | 0,44   | 1,5 |
| II                    | 641,28-641,38 m | 3,3        | 14,2       | 0,30   | 2,1 |
| III                   | 641,60-641,67 m | 0,5-0,8    | 10,9       | 0,16   | 2,1 |
| IV                    | 641,83-641,93 m | 5,0        | 8,3        | 0,27   | 3,2 |
|                       |                 | 150        | 21,8       | -      |     |
|                       |                 | 210        | 19,0       | 0,32   |     |
|                       |                 | 240        | 18,2       | -      |     |
| Einzelne Werte aus    |                 | 11         | 17,4       | -      |     |
| verschiedenen ande-   |                 | 27         | 14,7       | -      |     |
| ren Proben des Hori-  |                 | <1         | 13,5       | 0,20   |     |
| zontes (nach Angaben  |                 | <1         | 9,9        | -      |     |
| von Herrn Dr. ERHARD) |                 | <1         | 7,0        | -      |     |
|                       |                 | <1         | 12,2       | 0,32   |     |
|                       |                 | 2,0        | 13,4       | -      |     |
|                       |                 | <u>1,3</u> | <u>9,8</u> | -      |     |
| arithmetisches Mittel |                 | 46,6       | 14,0       |        |     |
| Standardabweichung    | $\pm$           | 82,2       | $\pm$      | 4,4    |     |

In der Bohrung Mürsbach III weist der Grenzkarneolhorizont eine Porosität zwischen 6 % und 15 % und einen Medianwert von 0,15 - 0,17 mm auf. Die Permeabilität liegt unter 1 md.

## 5. Petrographische Untersuchungen

### 5.1 Kornverteilung

Kurze Aufschlußbeschreibungen geben eine allgemeine Charakteristik des anstehenden Gesteins, sie unterliegen jedoch gewisser Subjektivität. Als Ergänzung dazu wurden deshalb verschiedene petrographische und physikalische Gesteinseigenschaften untersucht. Als besonders geeignet erwies sich die Aufstellung von Kornverteilungskurven, da mit bloßem Auge eine fazielle Entwicklung im einzelnen nur schwer verfolgbar ist.

Probennahme: Mit Ausnahme der Aufschlüsse Haig und Friedrichsburg, wo nur 2 Proben entnommen wurden, sind die restlichen Aufschlüsse mit 5 bis 7 Proben vertreten. Bei der Entnahme der Proben in der Aufschlußwand wurde sowohl einer gleichmässigen Verteilung als auch dem jeweiligen Anteil an grob- und feinkörnigen Banken Rechnung getragen, so daß das Material als repräsentativ für den Aufschluß angesehen werden kann.

Probenaufbereitung: Das verfestigte Material konnte zum Teil mit der Hand zerdrückt werden, zum Teil mußte der Backenbrecher hinzugezogen werden. Nach anschließendem Trocknen wurden je 1200 - 1500 g des Probenmaterials mit einem Mörser sorgfältig soweit zerkleinert, daß nur noch einzelne Körner vorhanden waren. Die Gewichtsprozentage der einzelnen Korngrößen wurden durch Trockensiebung ermittelt. Die Maschenweiten der einzelnen Siebe betrugen 0,063, - 0,100, - 0,200, - 0,315, - 0,63, - 1,25, - 2,0 mm.

# Korngröße (nach DIN 4022)

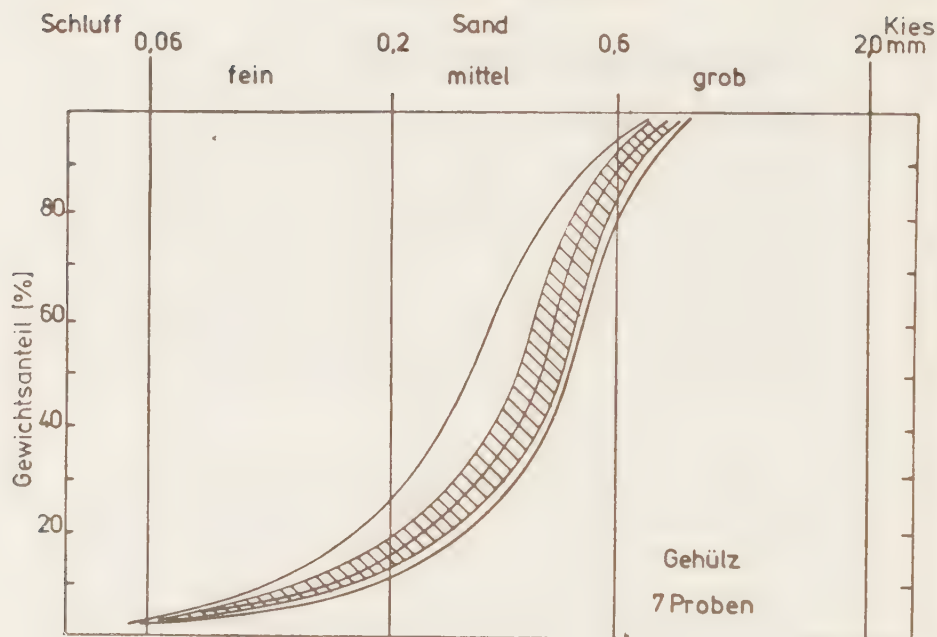


Abb. 5

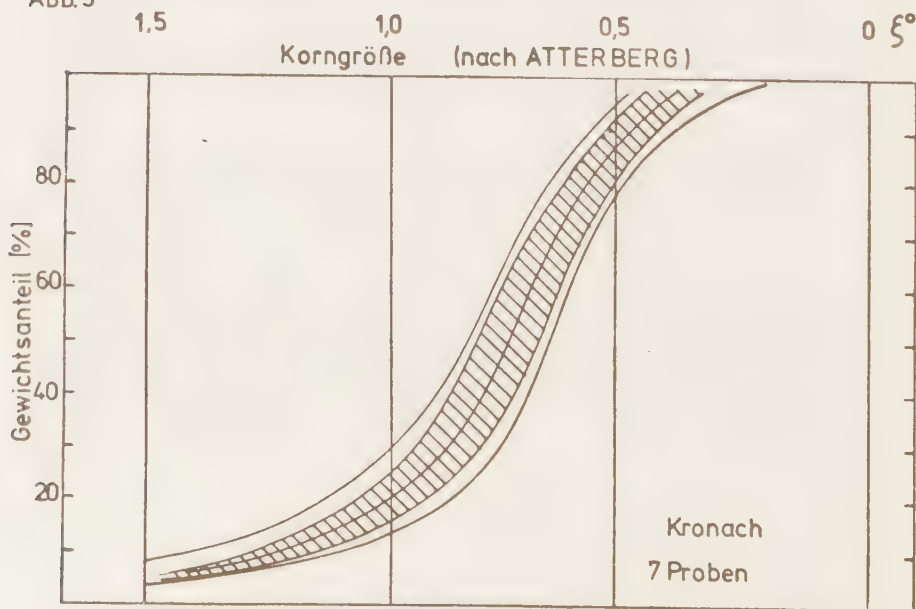


Abb. 6

Korngrößen-Gewichts-Verteilung (Summenkurven)

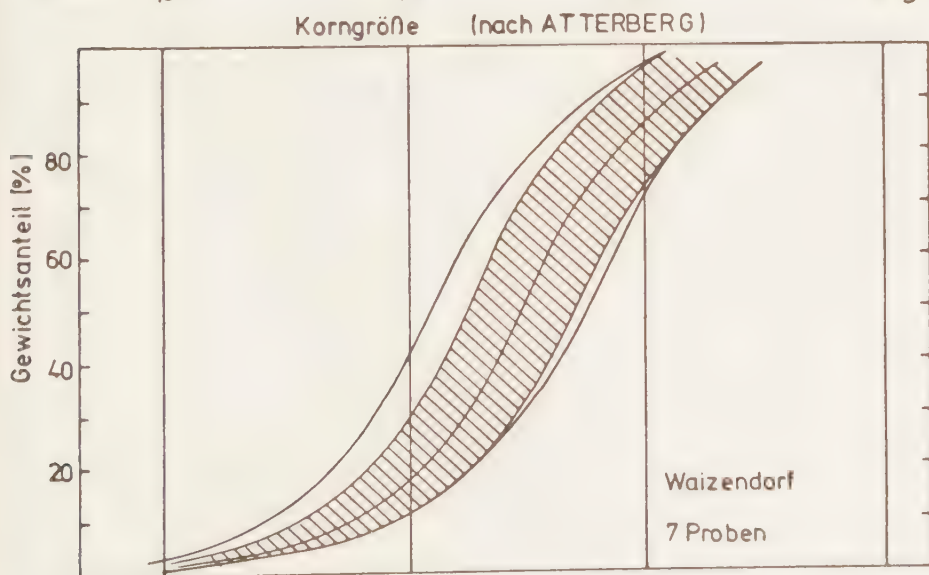
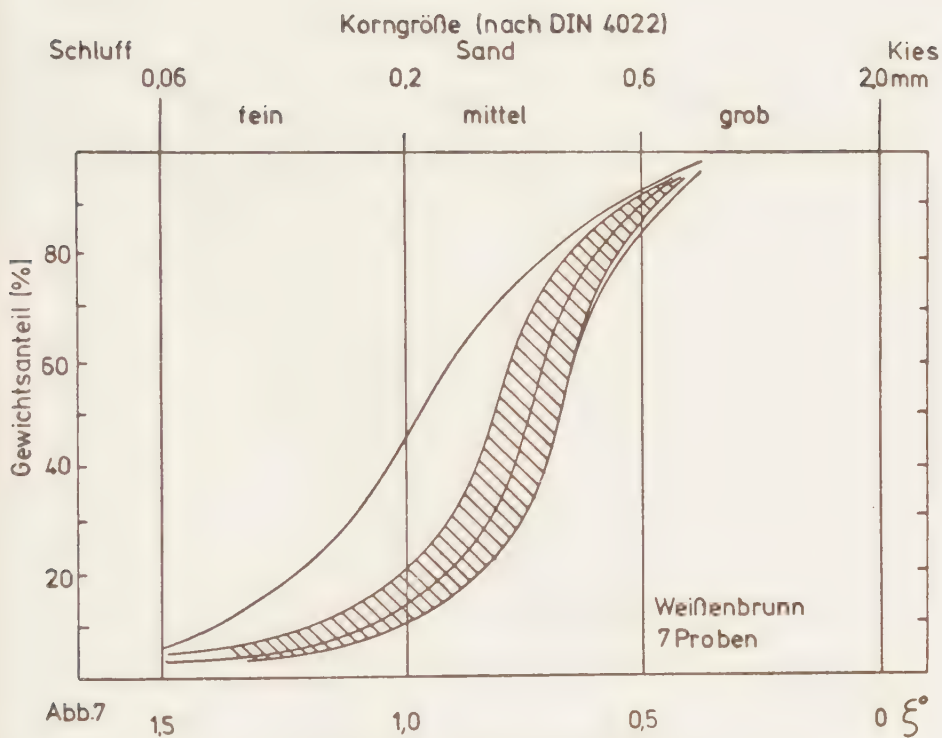


Abb.8 Korngrößen-Gewichts-Verteilung (Summenkurven)

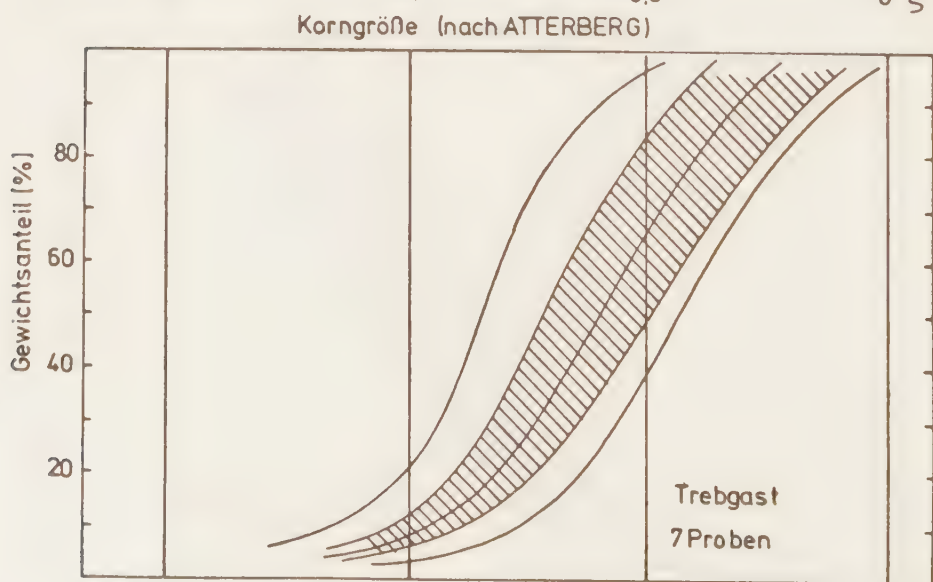
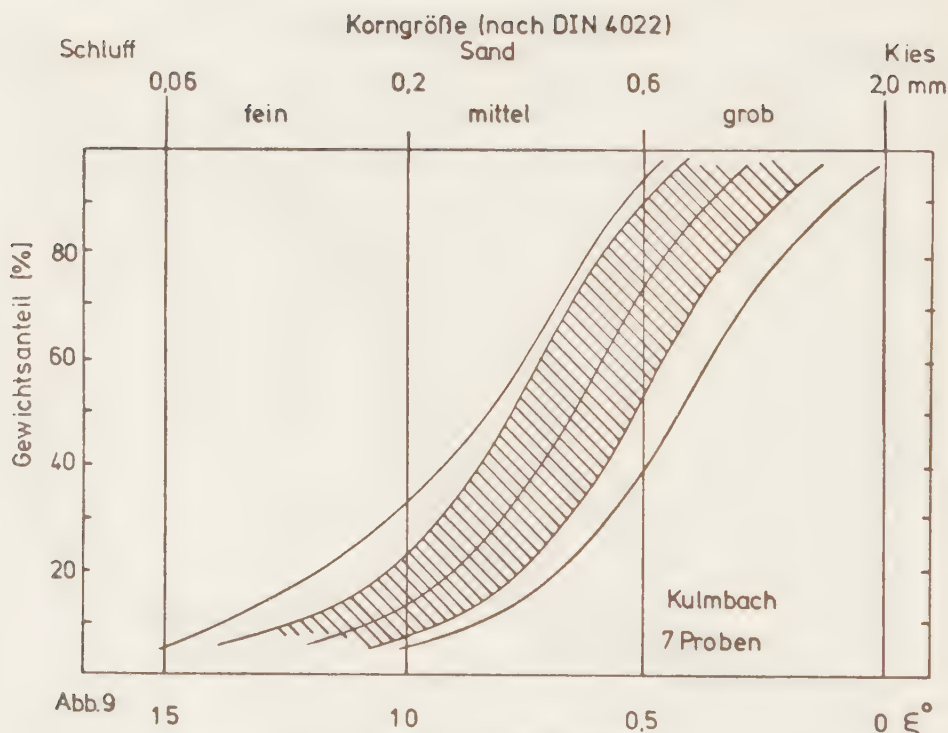


Abb.10 Korngrößen-Gewichts-Verteilung (Summenkurven)

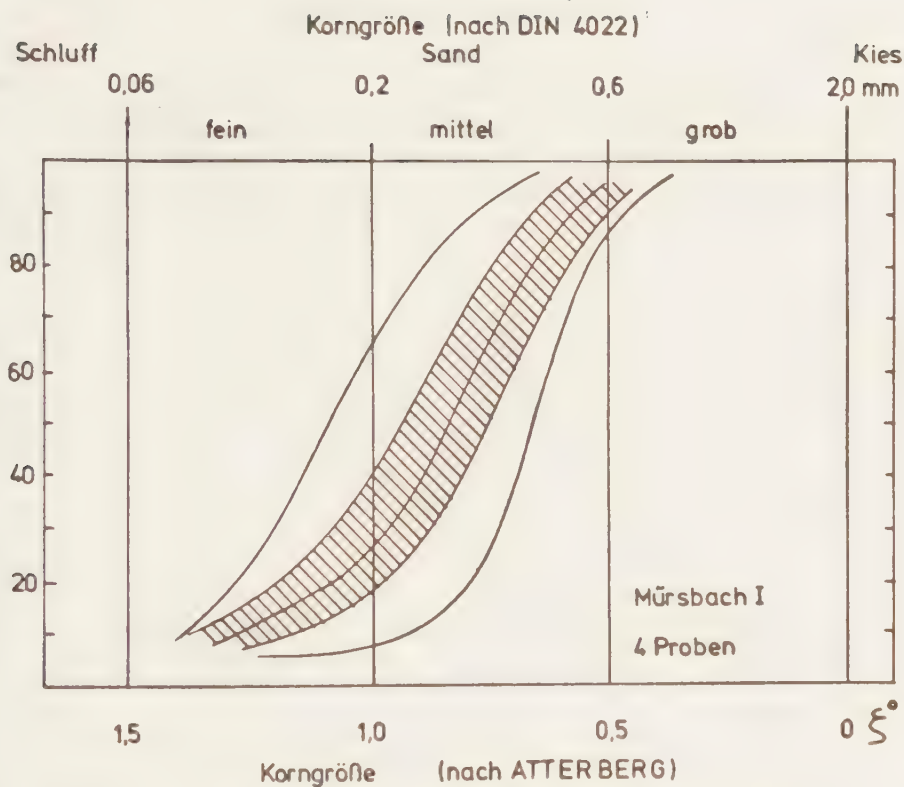


Abb.11

Korngrößen-Gewichts-Verteilung (Summenkurven)

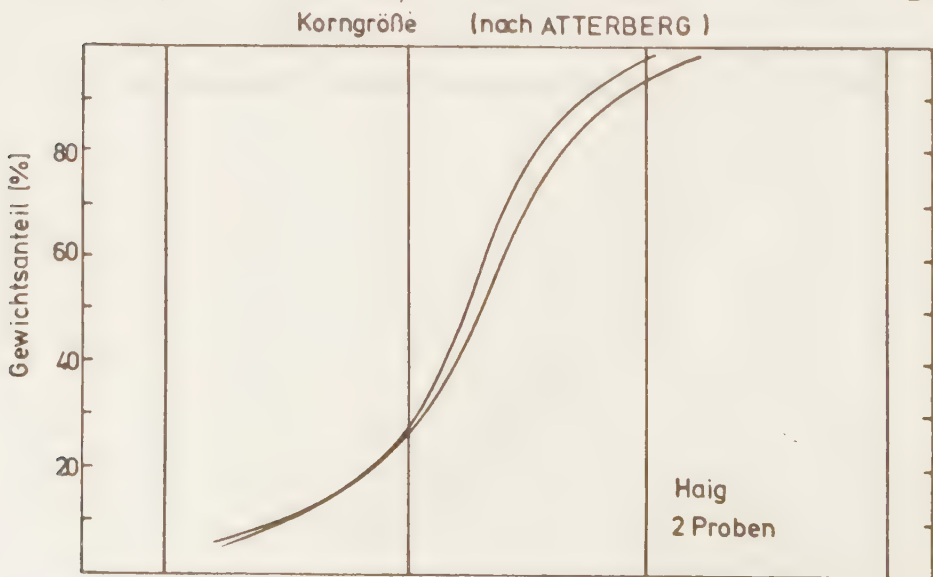
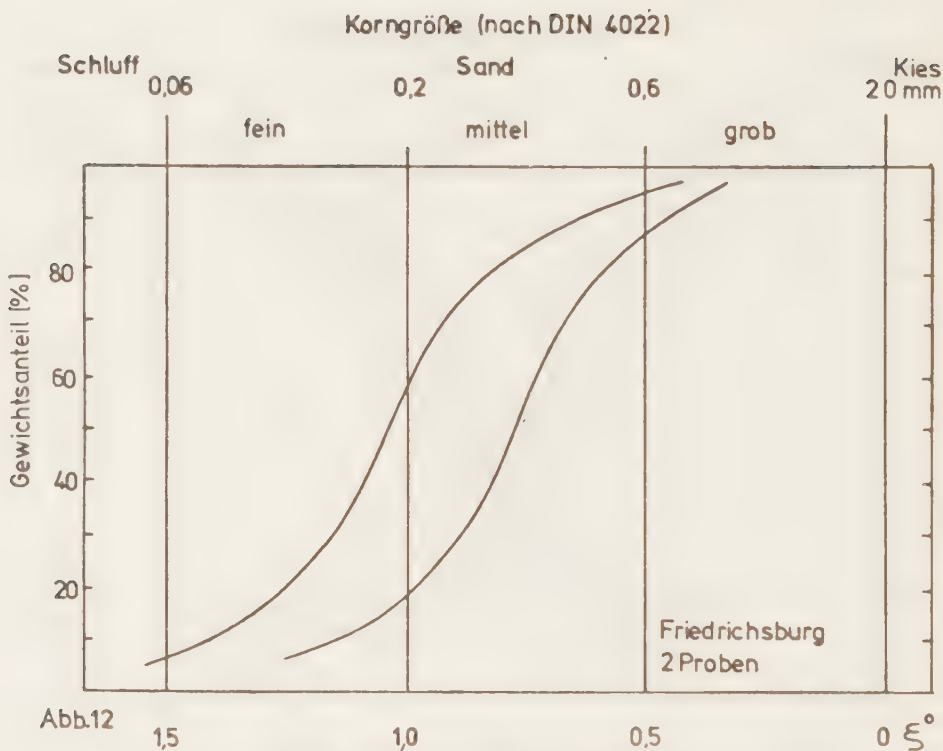


Abb.13 Korngrößen-Gewichts-Verteilung (Summenkurven)

Darstellung: Für die graphische Darstellung mehrerer Kornverteilungskurven gab man sich, bis auf wenige Ausnahmen, mit der Breite des Körnungsbandes zufrieden. Diese Methode gibt nur die Extremwerte der untersuchten Proben wieder und besitzt somit nur begrenzte Aussagekraft.

Handelt es sich wie im vorliegenden Fall um grobe und feine bzw. gut und schlecht sortierte Proben der Sandsteinbänke, so können mit einfachen Mitteln der Statistik noch feinere Unterschiede herausgearbeitet und dargestellt werden. Als Darstellung wurde die Korngrößen-Gewichts-Verteilung als Summenkurve im "relativierenden Korngrößenmaß" ( $\xi^0$ ) auf der Abszissenachse und im metrischen Maß auf der Ordinatenachse (Gewicht  $\alpha$ ) ausgewählt. Neben der Variationsbreite (Extremwerte) und dem Mittelwert (Abb. 5-13) wurde in Abb. 5-11 die Standardabweichung eingezeichnet.

$$\xi_i = - \log \frac{d \text{ [mm]}}{2 \text{ [mm]}} \quad (\text{Gleichung } 1)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\xi_i - \bar{\xi})^2}{N - 1}} \quad (\text{Gleichung } 2)$$

$\sigma_0$  = Standardabweichung

$\xi$  = log. Korngrößenmaß (nach ATTERBERG in WALGER 1965)

$d$  = Korndurchmesser [mm]

$N$  = Anzahl der Proben

Um das Verhältnis Grob- und Feinanteil zu charakterisieren, benutzt man außerdem verschiedene Kenngrößen, wie Ungleichförmigkeitsgrad  $U^+$ , Sortierungsgrad  $So^{++}$  und Steilheit  $S_x^{+++}$ .

In Tabelle 2 ist neben diesen Kennwerten noch der Medianwert ( $M=d_{50}$ ) angegeben:

Tabelle 2

|                       | U         | So         | M(mm)      | $S_x$      |
|-----------------------|-----------|------------|------------|------------|
| Haig                  | 3,0       | 1,7        | 0,30       | 0,23       |
| Gehülz                | 1,8       | 1,6        | 0,36       | 0,36       |
| Kronach               | 2,0       | 1,8        | 0,35       | 0,27       |
| Friedrichsburg        | 2,7       | 1,6        | 0,33       | 0,22       |
| Weißkirchen           | 1,9       | 1,5        | 0,35       | 0,35       |
| Kulmbach              | 2,2       | 1,6        | 0,45       | 0,37       |
| Waizendorf            | 2,1       | 1,5        | 0,33       | 0,30       |
| Trebgast              | 2,0       | 1,5        | 0,49       | 0,44       |
| Mürsbach I            | 2,0       | 1,5        | 0,29       | 0,24       |
| arithmetisches Mittel | 2,2       | 1,6        | 0,36       | 0,31       |
| Standardabweichung    | $\pm 0,4$ | $\pm 0,05$ | $\pm 0,07$ | $\pm 0,08$ |

$$\begin{aligned}
 + \quad U &= \frac{d_{60}}{d_{10}} \\
 ++ \quad So &= \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \\
 +++ \quad S_x &= \frac{d_{30}^2}{d_{60}-d_{10}}
 \end{aligned}$$

Ergebnis: Anhand der verschiedenen Kennwerte ist es möglich, die Aufschlüsse zu vergleichen und ihre fa-  
ziellen Zusammenhänge näher zu beleuchten.

Der wohl auffälligste Unterschied besteht in der Breite des Körnungsbandes (siehe auch Abb. 1). Es läßt sich daraus von NW nach SO eine zunehmende Aufgliederung in gröbere und feinkörnigere Bänke verfolgen. Während bei Kronach und Gehülz das Sediment noch einheitlich gleichkörnig ist, deutet sich bereits in Weißenbrunn eine Differenzierung an, die dann nach Süden fortschreitet und bei Trebgast am deutlichsten ausgeprägt ist. Mit dieser Entwicklung geht auch eine allgemeine Vergrößerung der Körner einher.

Ein Vergleich des Ungleichförmigkeitsgrades und Sortierungsgrades zeigt wenig Abweichung der Messergebnisse untereinander und auch keine regionale Verschiedenheit. Trotz der fortlaufenden Differenzierung von N nach S sind die Sedimente weitgehend als "gleichförmig" anzusprechen (Nomenklatur nach SCHULTZE & MUHS, 1967).

Nach diesen Kornverteilungen zu schließen, deutet sich eine fortschreitende Differenzierung eines fluviatilen Schuttfächers von NW nach SO an. Inwieweit eine laterale Entwicklung vom Schüttungszentrum daran beteiligt ist, kann aufgrund der schmalen Ausbisslinie nicht entschieden werden. Die Korngrößenverteilung allgemein spricht im Untersuchungsgebiet für ein geringes Gefälle zwischen Abtragungs- und Sedimentationsgebiet.

Beobachtungen wie Sedimentationslücken und Umlagerungen lassen häufig gerade in diesem Horizont erkennen, daß genauere Deutungen aus der Korngrößenverteilung zum Schüttungsmechanismus problematisch sind.

Überträgt man diese Ergebnisse auf das Faziesschema von LEITZ (siehe Abb. 2) kann angenommen werden, daß es sich um eine flache Mulde handelt, die vom SO her zugeschüttet wurde. Ähnliche Erscheinungen aus diesem Horizont werden von UDLUFT (1969) aus dem Gebiet der Südrhön beschrieben.

### 3.2 Kornrundung

Der Kornbestand des Sediments besteht, wie unten erläutert, aus Quarz und Feldspat. Wie zu erwarten, zeigen die Hauptbestandteile verschiedene Rundungsgrade. Während die Feldspäte entsprechend ihrer Spaltbarkeit in den meisten Fällen auf einer oder mehreren Seiten gerade Flächen zeigen, kommen bei den muschelrig brechenden Quarzen die verschiedensten Formen vor. Im Dünnschliff sind die Kornumrisse bei fast allen Körnern deutlich zu erkennen. Es kann jedoch nicht immer zwischen detritischem Korn und authigenen Bildungen unterschieden werden.

Vergleicht man den Rundungsgrad mit der Skala von CHABAKOW, so sind über die Hälfte der Körner der Klasse II zuzuordnen. Der Rest gehört zur Klasse I. Gerade bei dieser Klasse ist nicht immer klarzustellen, ob die einspringenden Winkel Bruchflächen darstellen oder durch Lösungen hervorgerufen wurden. Nur wenige Körner, meist die größeren, sind aufgrund ihrer ausgeprägten Rundungen in die Klasse III zu stellen. Bei Betrachtung unter der Lupe, sowie unter dem Elektronenmikroskop ist die primäre Gestalt der Körner durch Anwachssäume und aufgewachsene Neubildungen nur undeutlich zu erkennen.

### 3.3 Korneinregelung

Im Rahmen der sedimentpetrographischen Untersuchungen erschien es wichtig zu klären, inwieweit eine Einregelung der Körner vorhanden ist, da diese für die Permeabilitätsanisotropie mit verantwortlich sein könnte. Glimmerplättchen, die auf Schichtflächen angereichert sind, wurden hier nicht berücksichtigt.

Zur Untersuchung, ob und inwieweit stengelige bzw. plattige Quarz- und Feldspatkörner mit ihren Längsachsen sich bei der Sedimentation einregeln, wurden von 6 Schliffen (senkrecht zur Schichtung geschnitten) Diapositive angefertigt und die Richtung der Längsachsen gemessen. Je nach Korngröße wurden 100 bis 300 Körner mit mindestens einem Verhältnis Länge zu Breite 1,5 in ihrer Lagerung alle  $10^{\circ}$  zusammengefaßt und ihre Verteilung nach statistischen Methoden untersucht.

Einmal wurden die Streuungen einer zufälligen Verteilung mit den gemessenen Werten verglichen (variance ratio test). Zum zweiten wurde mit dem  $\chi^2$ -Test die Verteilung der Längsachsen über  $180^{\circ}$  mit einer Gleichverteilung verglichen. Beide Male stellte sich heraus, daß bei einem Ausagerisiko von 1 % diese Verteilungen nicht signifikant von einer rein zufälligen Verteilung differieren.

Da es sich bei diesen Messungen nur um einen zufälligen Schnitt, also um eine willkürliche Erfassung der Längsachsen der Körner handelt und die Lage des Schliffes zur Sedimentationsrichtung unbekannt ist, kann es durchaus möglich sein, daß die räumliche Anordnung der plattigen und stengeligen Körner doch mit den Sedimentationsbedingungen in Beziehung steht.

### 3.4 Schichtung

Wie die Schichtung im großen über den Aufschluß verteilt ist, wurde in Kap. 2.3 beschrieben. An dieser Stelle sollen die Feinschichtungen im Handstück und im Schliff untersucht werden.

Im vorhergehenden Kapitel wurde gezeigt, daß die Quarz- und Feldspatkörner nicht eingeregelt sind. Im Gegensatz dazu zeigen die Glimmer und Tonpartikel häufig regelmässige Anordnung. Die einzelnen Schichten sind meist getrennt durch dünne Lagen aus plattgedrückten Tongeröllern und dünnen Glimmertapeten. Die Schichtabstände schwanken zwischen 1 cm und mehreren dm.

Vereinzelte treten Glimmerfahnen auch außerhalb der Schichtflächen auf und sind oft treppenförmig oder dachziegelförmig übereinandergelagert.

An einigen Schliffen konnte auch eine Wechselschichtung von grob- und feinkörnigem Material im mm-Bereich nachgewiesen werden.

Alle diese Einregelungserscheinungen sind mitverantwortlich für die weiter unten beschriebene Permeabilitätsanisotropie (Kap. 4.5).

## 7.5 Quarzanteil

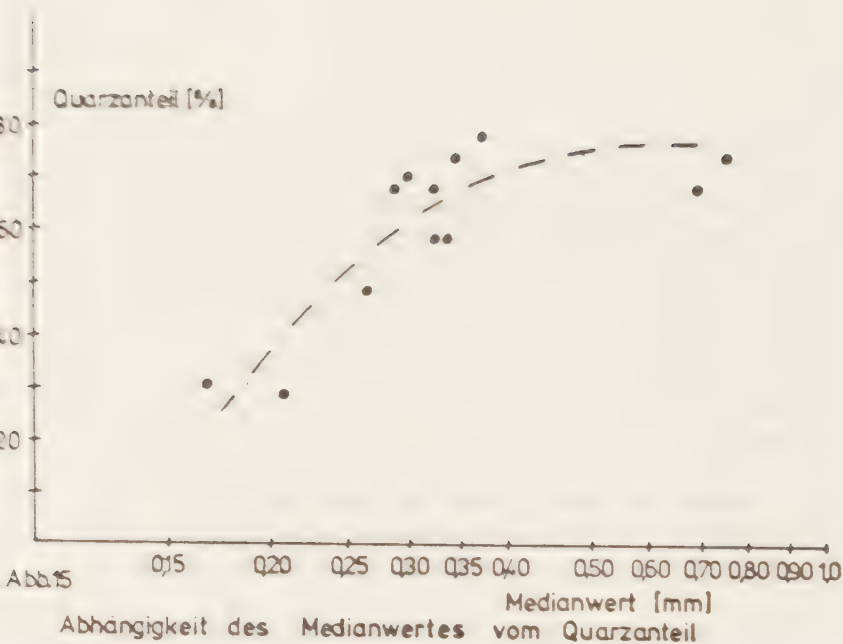
Kristalline Substanzen lassen sich mit Hilfe von Röntgenstrahlen nicht nur qualitativ, sondern bei geeignetem Verfahren auch quantitativ bestimmen. Dazu wurden die Sandsteine gebrochen und mit der Scheibenschwingmühle bis zu einer Korngröße im  $\mu\text{m}$ -Bereich gemahlen, um geeignete Präparate für das Röntgengoniometer zu gewinnen.

Da die absolute Intensität der Interferenzlinien nicht bekannt ist, wurde eine Eichkurve (KLUG & ALEXANDER 1954, S. 420) durch Zugabe eines inneren Standards (Fluorit) nach folgender Tabelle aufgestellt:

Tabelle 3

| Quarz | K-Feldspat<br>Gewicht in g | Fluorit | Quarz<br>% |
|-------|----------------------------|---------|------------|
| 2,00  | 0,00                       | 1,00    | 100        |
| 1,60  | 0,40                       | 1,00    | 80         |
| 1,20  | 0,80                       | 1,00    | 60         |
| 0,80  | 1,20                       | 1,00    | 40         |
| 0,60  | 1,40                       | 1,00    | 30         |
| 0,40  | 1,60                       | 1,00    | 20         |
| 0,20  | 1,80                       | 1,00    | 10         |
| 0,10  | 1,90                       | 1,00    | 5          |

Durch Auswahl eines geeigneten Beugungswinkels (Quarz:  $2\psi = 36,53^\circ$ ; Fluorit:  $2\psi = 55,76^\circ$  - $\text{CuK}_\alpha$ -Strahlung) konnten günstige Meßbedingungen geschaffen werden.



$FI/Q$  = Fläche Flußspat zu Fläche Quarz

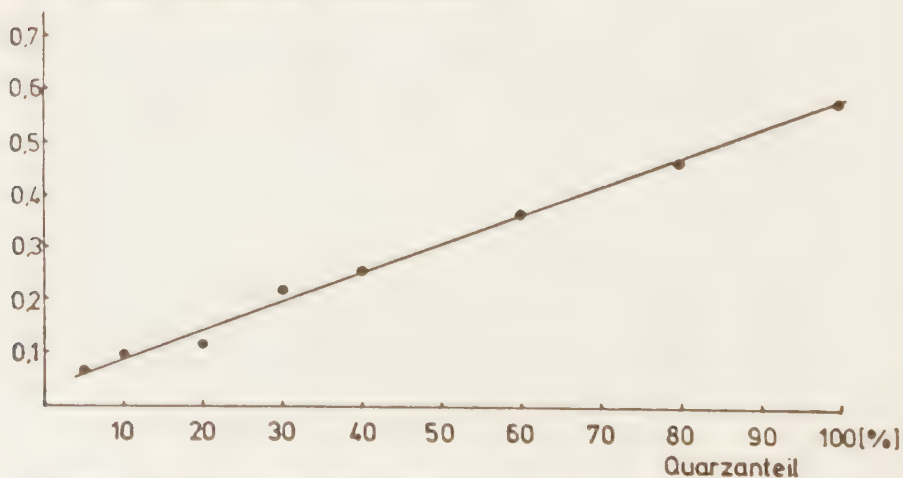


Abb. 14 Eichkurve zur Bestimmung des Quarzanteils

Das Verhältnis der Höhen der Interferenzlinien über der Grundlinie ist gewöhnlich das Maß für das Verhältnis der Gemischanteile. Da durch die geringe Korngröße die jeweiligen Spitzen auseinander gezogen sind, wurden die Flächen als Vergleichsmaß herangezogen. Je Probe wurden 2 Präparate angefertigt, die je 2 mal vermessen wurden. Aus den 4 erhaltenen Werten wurde das arithmetische Mittel errechnet.

Der Meßfehler dieses Verfahrens wird in der Literatur (LUG & ALEXANDER 1954, NEFF 1962 u. BRADSHAW 1967) mit 5 bis 10 % angegeben.

Die Quarzanteile liegen, wie in Abb. 15 wiedergegeben, bei 30 - 80 %; der Rest besteht vorwiegend aus Feldspat. Das Gestein ist somit als "saure Arkose" (FUCHTBAUER & HÜLLER 1970, S. 120) angegeben. Diese Methode bringt gegenüber dem direkten Auszählen im Dünnschliff nicht nur den Vorteil der Zeitersparnis, sondern es können auch unverfestigte Proben vermessen werden.

Ergebnis: Trägt man den Medianwert gegen den prozentualen Quarzgehalt auf (Abb. 15), ist eine zunehmende Korngröße mit steigendem Quarzanteil zu erkennen. Diese Tatsache findet ihre Erklärung in der größeren mechanischen Resistenz der Quarzkörner. Je nach Strömungsintensität kam es bei starker Strömung zur Sedimentation von Quarzkörnern, die während des Transportes weniger zerkleinert wurden. Die Feldspatkörner wurden dadurch relativ weiterbewegt. Bei Nachlassen der Strömung konnten die Quarze bedingt durch ihre Größe nicht mehr so weit getragen werden und es kam zur Differenzierung des Sediments in feinkörnige feldspatreiche und grobkörnige quarzreiche Schichten.

Diese Differentiation kann nicht nur mit der Entfernung vom Liefergebiet, sondern auch in lateraler Richtung, erfolgen.

Durch diese Zusammenhänge hat bereits der Mineralbestand primär bei der Sedimentation Einfluß auf die Porengröße, Porenform und damit auf die Permeabilität, ganz abgesehen von den Sekundärprozessen, die durch den unterschiedlichen Chemismus bei der Diagenese beeinflußt werden.

### 3.6 Diagenetische Veränderungen

Durch vielfältige diagenetische Veränderungen seit der Entstehung des Sedimentgefüges wurden die heutigen Porenformen gebildet.

Für den primären Stoffbestand sind die Ausgangsgesteine in der distributiven Provinz, die Transportauslese, das Bildungsmilieu und das Klima während der Sedimentation in erster Linie verantwortlich.

Die diagenetischen Lösungserscheinungen und die Bildung neuer Minerale sind vor allem auf den Chemismus der zirkulierenden Wässer zurückzuführen. Ebenso spielt der Gebirgsdruck eine Rolle. Da die einzelnen Erscheinungen aber oft nebeneinander auftreten und sehr komplexe Vorgänge anzeigen, konnten weder die zeitliche Abfolge noch der chemische Reaktionsmechanismus im Rahmen dieser Arbeit im einzelnen geklärt werden. Die Untersuchungen zeigten eine Reihe von Mineralparagenesen, die für die Porengestaltung und damit für die Permeabilität von Bedeutung sind.

Die makroskopischen Untersuchungen wurden am Handstück und im Aufschluß durchgeführt. Die Detailbeobachtungen stützten sich auf über 80 Dünnschliffe und eine Vielzahl von Bildern, die unter dem Rasterelektronenmikroskop aufgenommen wurden.

Kieselsäure: Neben den detritischen Körnern zeigt die Kieselsäure, die während der Diagenese umgelagert wurde, vielfältige Erscheinungsformen.

- a) Der Hauptteil entfällt auf die Intergranularmasse, die als amorpher bis mikrokristalliner Zement die Körner miteinander verbindet. Ihre Form ist außerordentlich vielgestaltig; meist bildet sie pilz- oder wulstförmige Aufwachsungen und zeigt auch netzartige Strukturen auf den Körnern. In Dünnschliffen konnte an einigen Stellen eine beginnende radiale Anordnung dieser Bildungen beobachtet werden, was eine Kristallisation andeutet (KAISER 1926). Unter dem Polarisationsmikroskop bilden häufig diese sekundären Kristalle durch Ineinanderwachsen eine typische fleckige Struktur.
- b) Eine andere Erscheinungsform sind dünne Überzüge, vor allem an glatten Kristallflächen. In den meisten Fällen schließen sie kleine Körnchen mit ein, so daß die Sandpartikel mit vielen kleinen Knötchen überzogen sind.
- c) Übergänge von Aufwachsungen und echten Anwachssäumen bzw. weitergewachsenen Kristallen sind nur im Polarisationsmikroskop zueinander zu halten. Anwachssäume grenzen sich oft gegen den ursprünglichen Kristall durch einen Saum oder linienförmige Aufreihung von Verunreinigungen ab.

- d) Die Bildung idiomorpher und hypidiomorpher Quarz-  
kristalle tritt gegenüber den vorher genannten For-  
men etwas in den Hintergrund. Ideale Wachstumsbedin-  
gungen für die Entstehung der Kristalle bilden die  
Drusen, die einen Durchmesser bis zu 4 cm aufweisen.  
Diese Hohlstrukturen wurden bevorzugt gebildet durch  
die Auslaugung von Dolomitknollen (GUDDEN 1955) und  
zeigen schalenförmige Anwachszone. Die Außenzone  
besteht aus einer festen Karneolrinde; nach innen zu  
wachsen die Quarzkristalle auf, und ganz im Inneren  
wird die Druse von dunkelbraunem bis schwarzem Eisen-  
und Mangankonglomerat ausgefüllt.

Kristalle mit idiomorphen Flächen entstehen aber auch  
in den Poren des Sandsteins, und sogar als Verdrängun-  
gen in Feldspatkörnern konnten sie gefunden werden.

- e) Typische Karneolbildungen, wie sie von den Bearbei-  
tern des Buntsandsteins (z.B. STEINLEIN 1953) be-  
schrieben werden und dem Horizont den Namen gaben,  
konnten in den Aufschlüssen um Kulmbach nur selten  
und um Kronach kaum nachgewiesen werden.

LEITZ (mündliche Mitteilung) stellte fest, daß die  
Karneole im Raum Kulmbach noch im Sediment eingeregelt  
und teilweise schichtgebunden sind, während sie nörd-  
lich davon auch als Umlagerungsprodukte verstreut im  
Sediment liegen, was einen Beweis für eine nicht zeit-  
gleiche Ablagerung des gesamten Horizonts liefert.

- f) Als Kluftfüllung konnte Kieselsäure nur im Aufschluß  
bei Trebgast gefunden werden. Dort sind ein bis zwei mm  
starke Klüfte, die in mehreren Phasen entstanden, mit  
Quarz ausgefüllt.

Feldspat: Im Gegensatz zu den Quarzkörnern sind die Feldspatkörner (es handelt sich zum Großteil um K-Feldspat) viel anfälliger gegenüber mechanischer und chemischer Zerstörung. So ist ein Großteil der Poren auf die Anlösung und das Zerbrechen dieser Körner zurückzuführen. Aus den Untersuchungen geht hervor, daß die sekundären Poren durch derartige Vorgänge zunehmen, während andererseits die Primärporen teilweise oder ganz zuwachsen. Feldspatneubildungen sind relativ selten und treten fast ausschließlich als Anwachssäume an detritischen Feldspatkörnern auf. Nach FÜCHTBAUER (1974) deuten diagenetische Feldspäte Süßwassermilieu und trockenes Klima während der Ablagerung an. Sie entstehen während der Frühdiagenese.

### 2.7 Porengeometrie und Porenentstehung

Durch Auswertung von über 80 Dünnschliffen und mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops konnte eine Reihe von Fragen zur Morphologie und Genese der Poren geklärt werden. In der Literatur wird nicht selten die Meinung vertreten, daß es sich bei den Sandsteinen um eine mehr oder weniger dichte Packung runder Körner handelt, die an ihren Berührungspunkten zusammengewachsen sind. Aus meinen Untersuchungen läßt sich nachweisen, daß die Poren zwischen nichtgelagerten Sandkörnern nur eine untergeordnete Rolle spielen. Viel häufiger sind die größeren Hohlräume, die durch Kornbrücken geteilt werden. Versucht man, die Poren nach ihrer Form und Entstehung zu gliedern, so ergibt sich folgendes Schema:

- a) Die Makroporen sind meist primärer Natur und werden von mehreren Mineralkörnern umgeben. Sie zeigen, daß die Körner bereits bei der Sedimentation nicht ihre dichteste Lagerung erreichen. Diese Hohlräume können dann sekundär ausgefüllt werden. Im Gestein aus den Bohrungen ist eine Anhydrit- und Dolomitfüllung zu beobachten. In den Oberflächensandsteinen sind diese Bildungen wieder gelöst und können teilweise durch andere Substanzen (meist Kiesensaureausscheidungen) ersetzt oder nur an den Rändern mit Eisenhydroxiden ausgekleidet sein. An einigen Schliffen konnte umgekehrt eine Abfolge von Eisenhydroxid an den Rändern und Kieselsäureausfällungen nach innen beobachtet werden.

Wie in Kap. 4.2 gezeigt wird, kann der prozentuale Anteil solch größerer Poren mit physikalischen Meßmethoden nicht erfaßt werden und nur mit Hilfe von Dünnschliffen abgeschätzt werden. Er dürfte etwa mit 10 bis 30 % am Gesamtporenraum beteiligt sein.

- b) Die Mikroporen, zu denen ich alle die Hohlräume zählen möchte, die wesentlich kleiner sind als das einzelne Korn, können wiederum in 3 Gruppen eingeteilt werden.

Zwickelporen entstehen beim Aneinanderlegen von rundlichen Körnern und zeigen dreieckige Querschnitte. Theoretisch müßten sie einen hohen Prozentsatz (s. Kap. 4.1) ausmachen; tatsächlich ist jedoch das Gegenteil der Fall. Es konnte nämlich festgestellt werden, daß die Körner - weil sie keine Kugelform aufweisen - häufig eine dichtere Lagerung bevorzugen und wenig Raum für derartige Zwischenräume übrig lassen.

Die Mehrzahl von ihnen, die bei der Ablagerung entstanden ist, wurde während der Diagenese durch Drucklösung mit Zement gefüllt.

P o r e n in der I n t e r g r a n u l a r s u b s t a n z bilden labyrinthartige Schläuche (Bildtafel I Abb. 3), deren Genese durch schuppenartiges oder pilzförmiges Aufwachsen von Intergranularsubstanz bedingt ist. Ihre Größe liegt durchschnittlich zwischen 50 und 300  $\mu\text{m}$ . Es ist jedoch nicht immer auszuschließen, daß auch Lösungsprozesse auf deren Gestaltung Einfluß ausübten. Manchmal zeigen diese Poren parallele oder strahlenförmig auseinanderlaufende Strukturen. Im allgemeinen sind sie unregelmässig in ihrer Form und über die gesamte Zwischenkornsubstanz verteilt.

L ö s u n g s p o r e n sind eine häufige Erscheinungsform. Durch Änderungen im chemischen Gleichgewicht werden vor allem die Feldspäte angelöst und zerstört. Es entsteht dann ein typisches Porengefüge, das den kristallographischen Spaltrichtungen folgt (Tafel II, Abb. 1, Tafel I, Abb. 4). Sie liegen in der Größenordnung von 1 bis 50  $\mu\text{m}$ . An einigen Feldspäten wurde beobachtet, daß Bruchstücke von Lösungserscheinungen besonders bevorzugt werden. In erster Linie treten derartige Poren in den Oberflächenaufschlüssen in Erscheinung, sind aber auch in den Bohrkernen nicht selten zu finden.



Porenraum



Eisenausfällungen

Abb.16a Porenformen

### 3.8 Die Porenverteilung

Um die Porenverteilung im Bereich eines einzelnen Kerns (Größe 3 cm) zu untersuchen, wurden die Proben mit schwarzem Kunstharz getränkt und Dünnschliffe angefertigt. Von ausgewählten Präparaten wurden je Schliff 6 - 11 Fotos (Bereiche von 0,8 cm Kantenlänge) angefertigt und mit dem elektronischen Bildanalysiergerät (image analyzer VP-8) ausgewertet.

Dieses Gerät besteht aus einer Fernsehkamera, einem Farb Bildschirm und einem elektronischen Impulszähler. Die mit schwarzem Kunstharz gefärbten Gesteinsporen treten am Bildschirm in farbigen Kontrast zum umgehenden Gestein (z.B. blau zu gelb). Durch entsprechende Eichung der Bildschirmfläche können dann die Anteile der einzelnen Farbflächen, d.h. Porenfläche oder Gesteinsfläche direkt an der elektronischen Anzeige auf ca. 2 % genau abgelesen werden.

Die Messungen ergaben, daß die Porosität statistisch über den Schliff verteilt ist und nicht an eine Mikroschichtung gebunden ist (siehe auch Kap. 3.3 über Korn-einregelung und Schichtung). Die maximale Streuung zwischen den einzelnen ausgewerteten Bereichen betrug 4 Flächen-%.

Ursprünglich wurde diese Untersuchungsmethode zur direkten Porositätsbestimmung entwickelt. Bei Vergleichen mit den anderen Meßmethoden (Kap. 4.1) ergab dieses Verfahren jedoch um 3 - 15 % weniger Porosität. Je feinkörniger das Gestein, umso geringer waren die gemessenen Porositätswerte.

Dadurch wurde klar, daß bei so feinkörnigen Sandsteinen (Porengröße im  $\mu\text{m}$ -Bereich) das verwendete Kunstharz eine zu hohe Viskosität besaß, um in die kleinsten Poren vorzudringen.

Bei entsprechend größeren Poren und bei Verwendung einer geeigneten Tränkungsflüssigkeit könnte diese Methode für die Porositätsbestimmung durchaus brauchbare Werte liefern.

## 4. Gesteinsphysikalische Untersuchungen

### 4.1 Porosität

Trotz genauer und vielfältiger Untersuchungen über den Porenraum von Sandsteinen zeigt sich in der einschlägigen Literatur eine deutliche Verschiedenheit in Definition und Nomenklatur der Porosität. So werden unterschiedliche Begriffe wie absolute, allgemeine, effektive, nutzbare, statische und dynamische Porosität sowie der Ausdruck "specific yield" aufgestellt und unterschiedlich interpretiert.

Nach v. ENGELHARTT (1960, S. 2) versteht man unter totaler oder absoluter Porosität das gesamte Porenvolumen des Gesteins, auch das der allseitig umschlossenen Poren. Die effektive oder Nutzporosität umfaßt nach v. ENGELHARTT das Volumen aller miteinander in Verbindung stehender Poren.

Im Gegensatz dazu sieht SNARSKY (1963) in der effektiven Porosität nur den Porenraum, der tatsächlich vom strömenden Medium durchflossen wird (die sogenannten Sackgassenporen werden nicht mit dazu gezählt). Weiter gliedert er die effektive Porosität auf in statische und dynamische Porosität. Die statische Porosität wird gewonnen aus Dünnschliffmessungen und theoretischen Berechnungen, wogegen die dynamische aus Laboruntersuchungen ermittelt wird und geschwindigkeits- und flüssigkeitsabhängig ist.

Im Bereich der Hydrologie wird oft der Ausdruck "specific yield" angewandt (BEAR 1972). Das entspricht der von BUSCH & LUCKNER (1974, S. 169) definierten "dränbaren Porosität". Man versteht darunter die Differenz zwischen der Porosität und den Anteilen der Porosität, die vor der Dränung keine Flüssigkeit enthielten und solchen, die nach der Dränung mit Flüssigkeit gefüllt bleiben. Daneben definieren diese Autoren noch die "auffüllbare Porosität" als die Differenz zwischen der Porosität  $n$  und den Anteilen der Porosität, die vor der Auffüllung bereits gefüllt sind und nach der Auffüllung keine Flüssigkeit enthalten.

Die von BEAR (1972) eingeführten Ausdrücke "areal" und "linear porosity" bezeichnen dagegen nur ein Verfahren, wodurch aus flächenhafter bzw. linearer Verteilung von Festkörper und Hohlraum auf die Porosität geschlossen wird (vergl. dazu CHACKLEY 1949).

Die aus theoretischen Überlegungen (v. ENGELHARDT & PITTER 1951, MEDER 1966) gefundenen Formeln zur Berechnung der Porosität befriedigen nicht vollkommen, da sie zwangsläufig von zu vereinfachten Modellvorstellungen (Kugelgestalt der Körner usw.) ausgehen.

Die komplexen Zusammenhänge zwischen Kornform, Gefüge, Lagerungsdichte und Zementation werden dabei meist nur durch einen Faktor berücksichtigt.

Angegeben wird der Porenanteil entweder als  $n$  in Prozent des Gesamtvolumens

$$n = \frac{V_p}{V_g} \cdot 100 [\%] \quad (\text{Gleichung 3})$$

oder als Porenziffer

$$\epsilon = \frac{V_p}{V_B} \quad \text{dimensionslos (Gleichung 4)}$$

### Meßverfahren

a) Die absolute Porosität (Def. nach v. ENGELHARDT 1960) wurde ermittelt nach der Formel

$$n = 1 - \frac{G}{V_{\text{Fest}} \rho} \quad (\text{Gleichung 5})$$

aus Volumen, Gewicht und spez. Gewicht.

Wie aus Dünnschliffuntersuchungen hervorgeht, besteht der Sandstein fast ausschließlich aus Quarz und Feldspat, was einer Dichte des Feststoffvolumens von  $2,65 \text{ g/cm}^3$  nahekommt:

|            |   |      |   |      |                 |
|------------|---|------|---|------|-----------------|
| K-Feldspat | - | 2,55 | - | 2,58 | $\text{g/cm}^3$ |
| Quarz      | - | 2,65 |   |      | $\text{g/cm}^3$ |
| Plagioklas | - | 2,62 | - | 2,74 | $\text{g/cm}^3$ |

b) Die effektive Porosität (Def. nach v. ENGELHARDT 1960) wurde mit dem Luftpyknometer und der Wassersättigungsmethode gemessen.

b<sub>1</sub>) Das Luftpyknometer (Fa. Ruska, Huston USA) arbeitet auf der Grundlage des idealen Gasgesetzes.

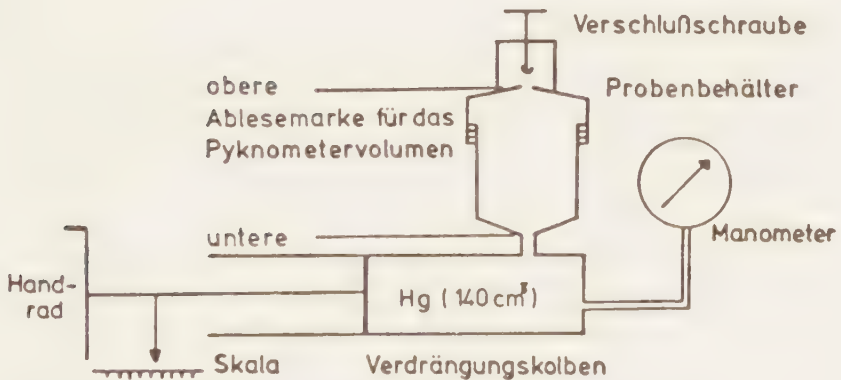


Abb.16b Messapparatur zur Porositätsbestimmung (schematisiert)  
(Luftpyknometer)

Vor jeder Messung wurde das Pyknometervolumen bestimmt, dann  $V_B$  (Probevolumen mit Poren), anschließend ein Referenzvolumen von  $40 \text{ cm}^3$  ( $V_{F40}$ ) und  $30 \text{ cm}^3$  ( $V_{F30}$ ) und bis zum Referenzdruck von 2 atü komprimiert. Aus den Meßergebnissen wurde die Porosität nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$F_P = \frac{10}{10 + V_P - V_{F40}} \quad (\text{Gleichung 6})$$

$$V_G = F_P (V_F' - V_{F40}) \text{ [cm}^3\text{]} \quad (\text{Gleichung 7})$$

$$V_P = V_B - V_G \text{ [cm}^3\text{]} \quad (\text{Gleichung 8})$$

$$n_M = \frac{V_P}{V_B} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (\text{Gleichung 9})$$

Nach TIETZE (1972) ergibt sich für den systematischen Fehler für das verwendete Pyknometer eine Abhängigkeit vom Gesteinsvolumen; diese wurde durch Messungen an porenfreien Probezylindern aus Stahl ermittelt. Das Anlegevolumen ist in diesem Fall gleich Null.

$$n = n_M - 0,8 \cdot \frac{(V_B - V_G)}{V_B} \text{ [\%]} \quad (\text{Gleichung 10})$$

Alle Meßwerte wurden danach korrigiert.

Weiter wurde der Einfluß der Rauigkeit der äußeren Probenoberfläche auf die Meßergebnisse geprüft: Eine Kernprobe mit glatter Oberfläche wurde zunächst im Ganzen auf ihre Porosität untersucht und dann in Stücke (Durchmesser ca. 1 cm) zerkleinert und nochmals vermessen. Durch die Zerkleinerung wurde die Oberfläche rauher und stark vergrößert.

Vergleich der Meßergebnisse

|       | Kernprobe  | alle Bruchstücke |
|-------|------------|------------------|
| n [%] | 18,2 ± 0,2 | 19,3 ± 0,4       |

b<sub>2</sub>) Im Vergleich dazu wurde die effektive Porosität mit der Wassersättigungsmethode gemessen, um eine Aussage über die Genauigkeit dieses viel weniger aufwendigen Meßverfahrens zu erhalten.

Zu diesem Zweck wurden die Gesteinskerne mit der Wasserstrahlpumpe entlüftet und anschließend mit entlüftetem Wasser getränkt und gewogen. Nach der Trocknung (1 Tag bei 105°C) wurde wieder gewogen.

Aus den verschiedenen Meßverfahren ergaben sich folgende Werte:

|                | <u>Abs.<br/>Poros.I</u> | <u>Abs.<br/>Poros.II</u> | <u>Eff.Poros.<br/>(WS)</u> | <u>Eff.Poros.<br/>(Pyknom.)</u> |
|----------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Gehülz         | 22,3                    | 24,0                     | 21,5                       | 22,3                            |
| Kronach        | 20,5                    | 24,7                     | 22,3                       | 22,6                            |
| Haig I         | 18,6                    | 21,6                     | 20,9                       | 19,4                            |
| Haig II        | 23,4                    | 26,0                     | 23,4                       | 24,7                            |
| Weißbr. I      | 21,0                    | 24,7                     | 22,1                       | 22,5                            |
| Weißbr. II     | 16,7                    | 20,6                     | 17,5                       | 19,7                            |
| Friedrichsb. I | 22,5                    | 21,8                     | 22,9                       | 18,7                            |
| Friedrichsb.II |                         | 23,0                     | 17,0                       | 21,6                            |
| Kulmbach       | 25,7                    | 27,7                     | 25,6                       | 25,4                            |

gemessen an verschiedenen Kernen (jedoch aus demselben "Handstück"  
Größe ca. 20\*20\*20 cm)

gemessen an denselben Kernen

Fehlerbetrachtung: Bei der Messung der absoluten Porosität sind besonders zwei systematische Fehler zu beachten: Die Wägegenauigkeit beträgt 0,1 g, was bei den Probekörpern einer Porenvolumenänderung von ca. 0,2 % entspricht. Weiter ergibt sich ein Fehler bei der Berechnung des Zylindervolumens, da die Kernprobe, vor allem nach mehreren Meßvorgängen, an den Kanten durch Ausbrechen einiger Körner etwas gerundet ist. Dies täuscht eine Vergrößerung des Porenvolumens vor. Daraus resultieren die Unterschiede in Spalte I und II.

Neben der Ablesegenauigkeit bedingt das Anlegevolumen bei der Messung der effektiven Porosität mit dem Pyknometer (Hg legt sich infolge seiner großen Oberflächenspannung nur an die äußersten Spitzen des Gesteins) und sein Verhältnis zum Gesamtvolumen entsprechende Abweichungen.

Ein Vergleich des Hg-Volumens, das bei der Messung zur Porenradienverteilung (Kap. 4.2) in die Probe gepreßt wurde, mit dem effektiven Porenvolumen (gemessen mit dem Pyknometer) ergab bei den entsprechenden Proben eine Abweichung von max. 1,5 % Porenvolumen.

Bei der Messung der effektiven Porosität mit der Wassersättigungsmethode gelten ebenfalls die Fehler der Wägung. Dazu kommen noch geringe Fehler, die durch Restluft in den Poren verursacht werden können.

Vergleich der Ergebnisse: Berücksichtigt man die Meßfehler der oben genannten Verfahren, so kann man bei den vorliegenden Sandsteinproben die absolute Porosität gleich der effektiven Porosität setzen. Das heißt, der gesamte Porenraum besteht aus untereinander in Verbindung stehenden Poren (vergl. v. ENGELHARDT, 1973 S. 201).

Weiter zeigt sich, daß bei derartigen Sandsteinen die einfachen Verfahren der Kernmessung und Wägung oder der Wassersättigung hinreichend genaue Ergebnisse erwarten lassen.

Legt man bei den Porositätsberechnungen die vereinfachte Modellvorstellung von dichtesten Kugelpackungen zugrunde, so ergibt sich immer die selbe Porosität (47,6 % bei kubischer Packung und 25,9 % bei hexagonalen Packung), unabhängig von der Korngröße. Im Gegensatz dazu tritt eine Porositätsverminderung ein, wenn die Kugeln ungleiche Größe aufweisen. Als Maß wird in der Praxis der Ungleichförmigkeitsgrad  $U$  und der Sortierungsgrad  $So$  angegeben (s. dazu Tab. 2).

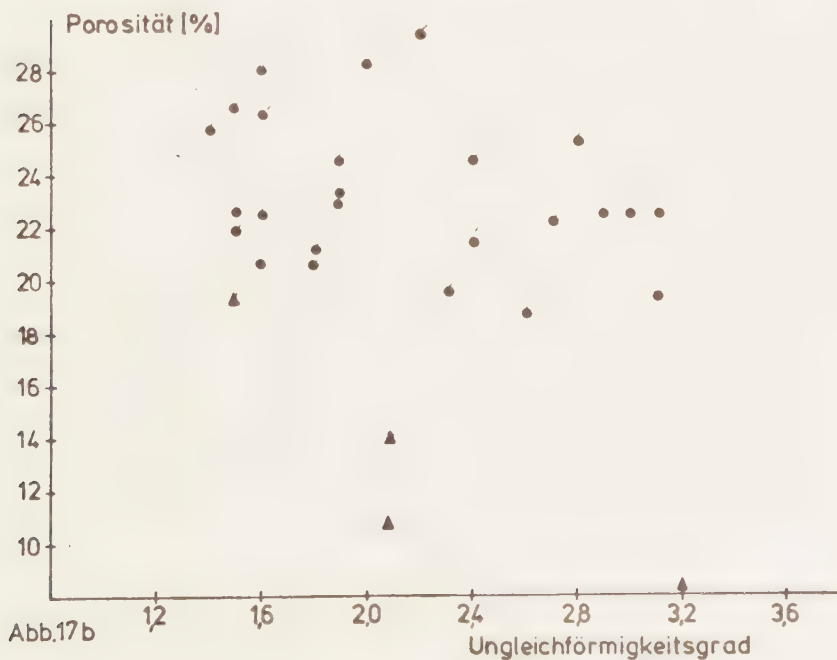
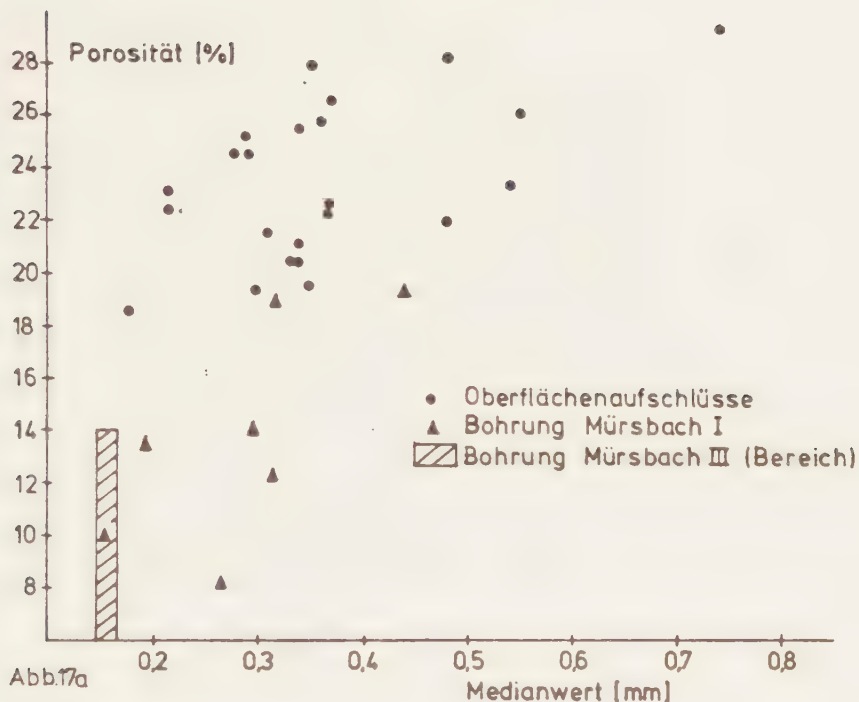
Inwieweit diese theoretischen Überlegungen sich auf die untersuchten Sandsteine auswirken, zeigen die Diagramme (17a und 17b): Auf Abb. 17a wurde der Medianwert gegen die Porosität aufgetragen. Läßt man die Proben aus den Mürsbacher Bohrungen außeracht, die durch eine andere diagenetische Geschichte geprägt sind, so steigt die Porosität mit zunehmender Korngröße.

Als Erklärung für diese Abweichung vom Modellbild muß man mehrere Faktoren in Betracht ziehen. Es ist zu beachten, daß sich bei abnehmender Korngröße theoretisch die Porosität nicht ändert, jedoch wird die Oberfläche in zunehmendem Maße vergrößert. Diese Tatsache bringt mit sich, daß die Anzahl der Kristallisationskeime vergrößert wird und so eine stärkere Zementbildung zur Folge hat. Wie später noch erläutert wird (Kap. 4.5), nimmt auch die Porosität Einfluß auf die Wegsamkeit von Wasser, und so könnte es bei größeren Sandkörnern, -d.h. größeren Poren - bei Sekundärprozessen zu bevorzugter Lösung des Bindemittels kommen.

Schwach verfertigte Sandsteine zeigen nach v. ENGELHARDT (1973 S. 252) bei einer Versenkung von über 1000 m ein unterschiedliches Verhalten in der Porosität. So nimmt die Porosität mit steigender Korngröße ab, was mit einem kleinen Reibungskoeffizient begründet wird. Das umgekehrte Verhalten bei den vorliegenden Sandsteinen beweist einen starken Einfluß der Sekundärprozesse (Lösung und Zementation) auf die Porenbildung.

Betrachtet man die Porositätsveränderung mit steigendem Ungleichförmigkeitsgrad, so zeigt sich eine zwar nicht sehr ausgeprägte, aber doch deutliche Abnahme des Porenvolumens. Dieses Ergebnis deckt sich mit den theoretischen Überlegungen.

Über die Zusammenhänge der Porosität und Permeabilität wird in Kap. 4.4 näher eingegangen.



## 2.2 Porenradienverteilung

Die Porenradienverteilung ist nur schwer zu bestimmen. Für die Abschätzung effektiver Porenweiten (Definition s. unten) im Bereich etwa über 200 Å ist die Quecksilberporosimetrie die am häufigsten angewandte Methode. Sie beruht auf der sog. Kapillardepression (Bei einer nicht benetzenden Flüssigkeit wie Quecksilber wird der Miniskus in einer Kapillare unter die umgebende Oberfläche gedrückt). Da Quecksilber einen festen Körper nicht benetzt, kann es nur bei erhöhtem Druck in die Gesteinsporen eindringen. Unter Annahme zylindrischer Poren geht man von der Überlegung aus, daß dem Druck, mit dem das Quecksilber ins Gestein gepreßt wird, seine Oberflächenspannung entgegensteht. Daraus folgt:

$$r^2 \pi \cdot p = - 2r \pi \cdot \sigma \cdot \cos \alpha^+ \quad (\text{Gleichung 11})$$

$r$  = Porenradius  $[\mu\text{m}]$

$p$  = Druck (atm)

$\sigma$  = Oberflächenspannung  $\left[ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}} \right]$  (für Hg = 480)

$\alpha$  = Randwinkel (für Hg  $140^\circ$ )

Bei Konstanz von  $\sigma$  und  $\alpha$  gilt

$$r = \frac{2 \cdot 26}{p} \quad [\mu\text{m}] \quad (\text{Gleichung 12})$$

Die Versuchsapparatur besteht aus folgenden Teilen:

1. Verdrängungskolben mit Handrad und Ablesevorrichtung, darauf aufgesetzt ein Probebehälter mit zwei Beobachtungsfenstern,
2. Druckflasche mit 3 Manometern (2,15 und 150 atm),
3. Vakuumteil, bestehend aus Drehschieberpumpe, Kühlfalle und Thermotron.

-----  
+ Der  $\cos$  von  $140^\circ$  bedingt das Minuszeichen.

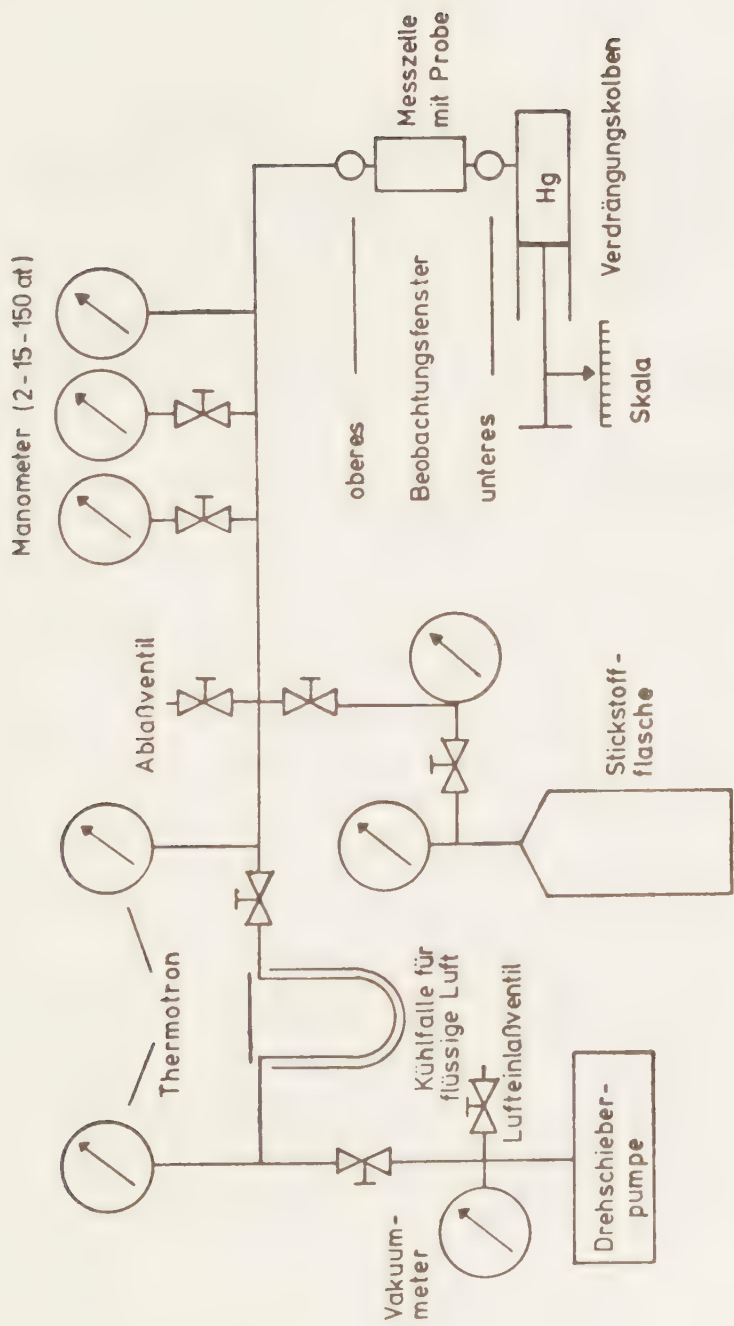


Abb.18 Schematische Darstellung der Kapillardruckapparatur

Meßvorgang: Nach dem Evakuieren der Meßapparatur auf  $10^{-3}$  Torr wird das Gesamtvolumen  $V_B$  (bulk volume) gemessen, indem man die Differenz bildet zwischen dem Fassungsvermögen des leeren Probebehälters und desselben mit Probe.

In 28 Schritten wurde der Druck bis auf 150 atm erhöht und das ins Gestein eingedrungene Quecksilber-volumen nachgestellt und mit dem entsprechenden Druck tabelliert.

Korrekturen: Wie RIECKMANN (1963) feststellte, besteht das nachgestellte Volumen  $V_{Hg}$  nicht nur aus dem ins Gestein eingedrungenen Hg-Volumen, sondern setzt sich zusammen aus:

$$V_{Hg} = (V_{Hg})_v + (V_{Hg})_a + (V_{Hg})_e \quad (\text{Gleichung 13})$$

$V_{Hg}$  = gesamtes Nachstellvolumen

$(V_{Hg})_v$  = Druck-Volumen-Korrektur

$(V_{Hg})_a$  = Anlegekorrektur

$(V_{Hg})_e$  = Eindringvolumen

Die Druck-Volumen-Korrektur  $(V_{Hg})_v$  resultiert aus der zunehmenden Kompression des Quecksilbers und der Ausdehnung des Meßgefäßes und wurde einem unveröffentlichten Manuskript von TIETZE (1971) entnommen.

Das Anlegevolumen  $(V_{Hg})_a$  ist für die Porenradienverteilung besonders wichtig (Abb. 19). Nach RIECKMANN (1963) wird der Anfang der Kapillardruckkurve auf halblogarithmischem Papier ( $p$  über  $V_{Hg} - (V_{Hg})_v$ ) aufgetragen und der Wendepunkt festgelegt.

Dann wird  $\frac{1}{p}$  über  $(V_{Hg} - (V_{Hg})_v)$  aufgetragen und die auf einer Geraden liegenden Punkte der Kapillarkurve bis zur Ordinate verlängert. Der Wendepunkt der Kurve zeigt dann den Übergang vom Anlegen des Quecksilbers an die Gesteinsoberfläche zum Eindringen. Daraus ergibt sich dann für den jeweiligen Druck die Korrektur  $(V_{Hg})_a$ .

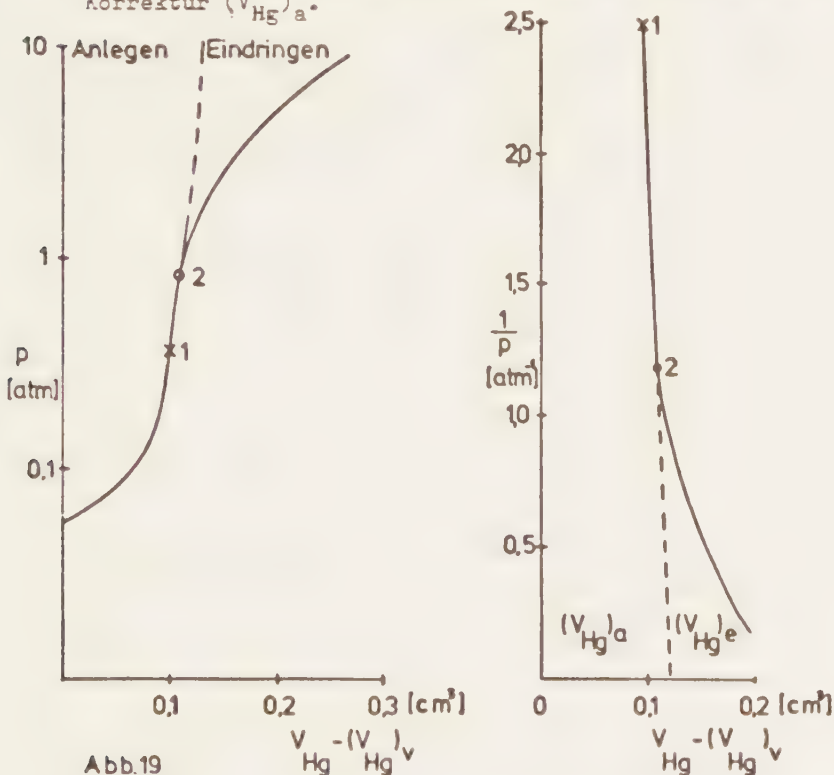


Abb. 19

Die Ermittlung der Anlegekorrektur (nach RIECKMANN)

1 = Wendepunkt nach der  $\log p$ -Darstellung

2 = Beginnendes Eindringens nach der  $1/p$ -Darstellung

Das Eindringvolumen ergibt sich als

$$(V_{Hg})_e = V_{Hg} - (V_{Hg})_v - (V_{Hg})_a \quad (\text{Gleichung 11})$$

Aus Gleichung 12 dann die Porenradienverteilung:

|   |     |      |      |      |      |      |       |       |     |
|---|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|-----|
| r | µm  | 25   | 16   | 10   | 6,3  | 4,0  | 2,5   | 1,6   | 1,0 |
| p | atm | 0,29 | 0,45 | 0,73 | 1,15 | 1,82 | 2,9   | 4,5   | 7,3 |
| r | µm  | 0,63 | 0,4  | 0,25 | 0,16 | 0,10 | 0,063 | 0,040 |     |
| p | atm | 11,5 | 18,2 | 29   | 45   | 73   | 115   | 182   |     |

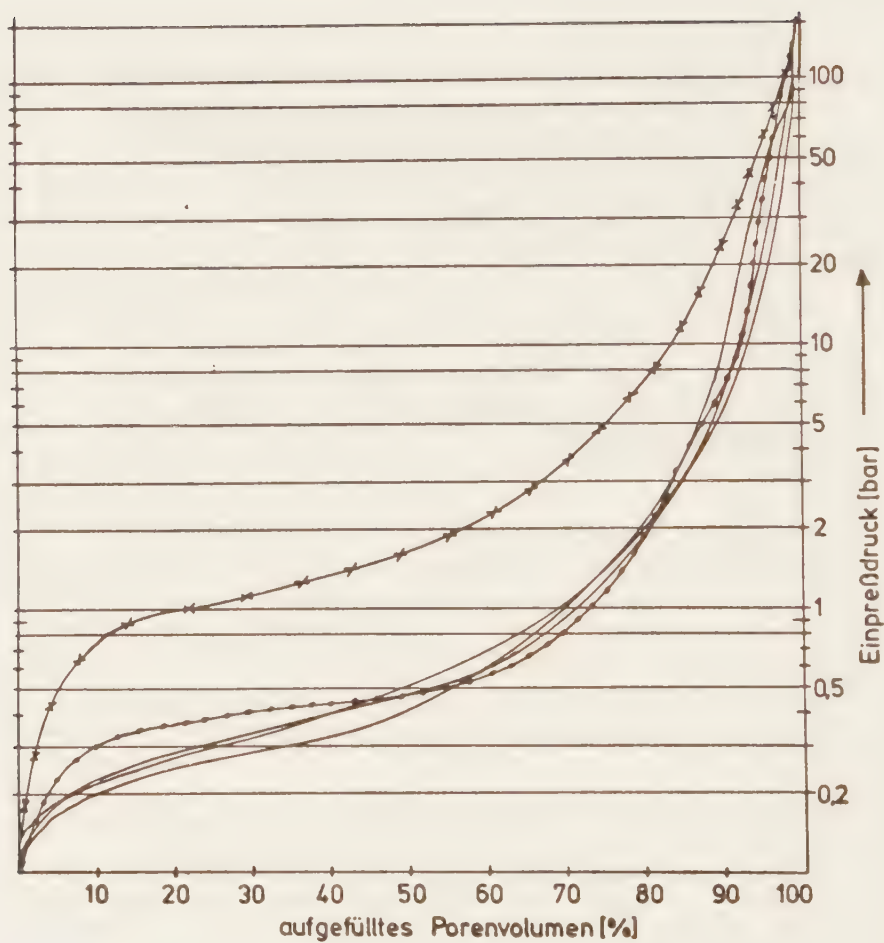
Mit der Kapillardruckapparatur wurden 5 Sandsteinproben gemessen und nach oben berechneter Methode die kapillarkurve (Abb. 20) und die Porenradienverteilung (Abb. 21) aufgetragen.

Fehlerbetrachtung: Durch Annahme vereinfachter Voraussetzungen ist diese Meßmethode mit verschiedenen Fehlern behaftet.

1. Bei der Gleichung 11 wird davon ausgegangen, daß der Porenradius kreisförmig ist, was bei natürlichen Gesteinen nicht der Fall ist.
2. Von verschiedenen Autoren werden der Randwinkel und die Oberflächenspannung unterschiedlich angegeben; weiterhin verändern chemische und physikalische Verunreinigungen nach JÜTGEN (1963) auch Druck und kapillarradius diese Werte.

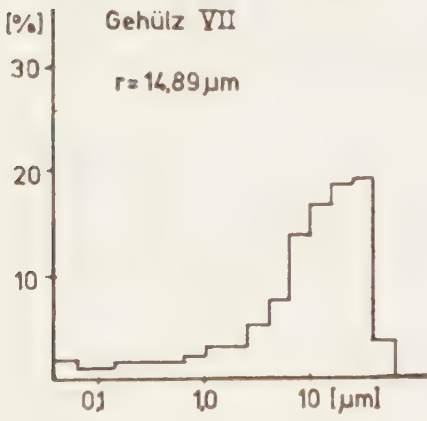
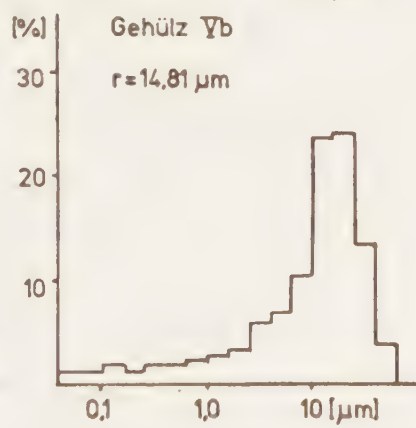
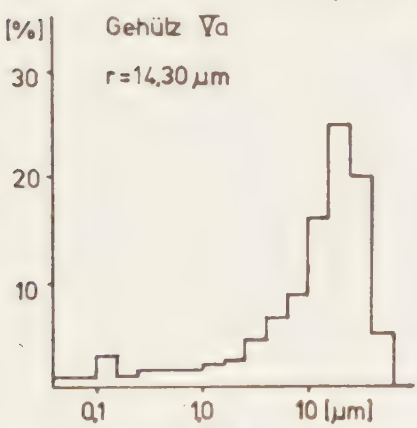
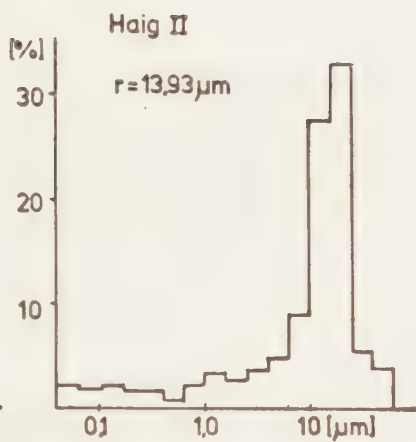
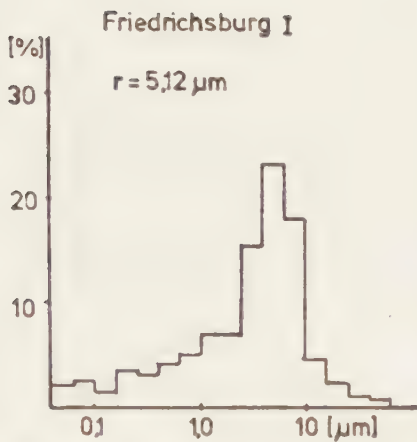
3. Wie aus den Elektronenmikroskopaufnahmen sichtbar wird, sind große Poren oft nur durch kleine Kanäle zugänglich. Bei der oben angegebenen Auswertung wird der für die kleinen Kapillaren zuständige Druck der hinter ihr gelegenen Pore zugeschrieben. Dadurch ist die gesamte Verteilungskurve mehr oder weniger zu kleineren Werten hin verschoben.

Da somit nicht eine wahre Porenradiusverteilung gemessen wird, soll  $r$  als effektiver Porenradius bezeichnet werden.



- x — Friedrichsburg I
- • — Haig II
- Gehülz Va, Vb, VII

Abb. 20 Kapillardruckkurven



**Porenradienverteilung**  
 ( $r$  = mittlerer Porenradius)

Abb.21

#### 4.3 Permeabilität

Die heute meist angewandte mathematische Darstellung der Strömung von Gasen und Flüssigkeiten durch poröse Medien stellt das Darcy-Gesetz dar:

$$V_f = J \cdot k \quad (\text{Gleichung 15})$$

$$v_f = \text{Filtergeschwindigkeit} \quad \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$$

$$J = \text{Gefälle}$$

$$k = \text{Durchlässigkeitsbeiwert} \\ (\text{cm/s; in der Hydrologie auch m/s})$$

Nach den in letzter Zeit gewonnenen Erkenntnissen weiß man aber, daß die Strömungsvorgänge in porösen Gesteinen viel komplexer und komplizierter sind, als sie in der Darcy-Gleichung dargestellt werden. Das Strömungsverhalten kann auch nur bedingt mit den hydraulischen Mechanismen in Rohren verglichen werden. Wie sich noch zeigen wird, besteht die Hauptschwierigkeit in der genauen Erfassung der Porengeometrie und der Porenstrukturen. Außerdem werden physikalisch-chemische Wechselwirkungen von Durchflußmedien und Gesteinen deutlich.

Die verschiedenen Kräfte wirken gleichzeitig. Ihr Einfluß ist bei den einzelnen Gesteinen und Strömungsintensitäten jedoch unterschiedlich. Meist wird das Widerstandsgesetz in folgender Form dargestellt.

$$J = C \cdot v_f^m = a v + b v^2 \quad (\text{Gleichung 16})$$

$$C = \text{konstant}$$

$$a = \text{Konstante des laminaren Anteils}$$

$$b = \text{Konstante des trägheitsbedingten Anteils}$$

Daraus ist bereits ersichtlich, daß die Darcy-Gleichung einen Spezialfall darstellt und nur das lineare Glied berücksichtigt bzw. voraussetzt:  $m = 1$ .

LUDEWIG (1967) kam durch seine Untersuchungen an Lockersedimenten zu folgender Einteilung der Strömungsbedingungen:

1. laminare Strömung

- a) lineare Abhängigkeit bei kleinem Einfluß der liotrophen<sup>+</sup> Erscheinungen und Fehlen des KLINKENBERG-Effekts und der Trägheitskraft (Darcy-Gleichung),
- b) nicht lineare Abhängigkeit bei entscheidendem Einfluß der sogenannten liotrophen Erscheinungen,
- c) nicht lineare Gesetzmässigkeit bei wachsendem Einfluß der Trägheitskräfte und Übergang zur Turbulenz,

2. Teilturbulenz

3. vollausgebildete Turbulenz

Speziell für das Durchströmen mit Gasen ist noch bei Punkt 1b auf den weiter unten genannten KLINKENBERG-Effekt (1941) der Gleitströmung zu achten.

-----

<sup>+</sup> Liotroph wird eine Flüssigkeit, wenn sie durch Wechselwirkung mit dem Gestein andere Eigenschaften als eine Newton'sche Flüssigkeit aufweist.

Es gibt weiterhin Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fließmedien und dem Gestein, die durch große Drucke hervorgerufen werden. So wächst z.B. die Viskosität bei Methan mit zunehmendem Druck (30 - 450 atm) um das 2,5-fache (A. SSOW et al. 1973); ebenso steigt die Gaslöslichkeit in Wasser, dagegen sinkt die Benetzbarkeit der Mineraloberfläche mit Wasser sehr stark ab.

Diese Erscheinungen können bei dem von mir verwendeten Druck vernachlässigt werden. Bei der Ausbeutung von Gas- und Öllagerstätten und ganz besonders bei der Projektierung von Untertage-Gasspeichern ist diesen Effekten jedoch besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

In der Praxis vereinfacht man diese Vorgänge und unterscheidet nach

- absoluter Permeabilität
- effektiver Permeabilität
- relativer Permeabilität.

Bei der absoluten Permeabilität wird als Strömungsmedium eine Newton'sche Flüssigkeit vorausgesetzt; die hiotrophen Erscheinungen werden nicht berücksichtigt.

Unter effektiver Permeabilität ist die tatsächliche Durchlässigkeit für eine oder mehrere Phasen (Gas-Wasser-Öl usw.) zu verstehen.

Die relative Permeabilität ist das Verhältnis von effektiver zu absoluter Durchlässigkeit.

#### 4.3.1 Die Bestimmung der absoluten Permeabilität

Zur Bestimmung der absoluten Durchlässigkeit  $K_L^+$  wurde Luft verwendet, da sie am Gestein keine chemischen oder physikalischen Veränderungen, z.B. Quellungen, verursacht. Durch Anbringen von Korrekturen (Kap. 4.3.2) an der Luftdurchlässigkeit  $K_L$  und eines Extrapolationsverfahrens wurde daraus  $K_F$  bestimmt.

$$K_L = \frac{\eta \cdot l}{F} \cdot \left( \frac{V}{t} \right)_{p_L} \cdot \frac{p_L}{\Delta p \cdot \bar{p}} [d] \quad (\text{Gleichung 17})$$

$$K_L = \text{Permeabilität für Luft} \quad [d = \frac{10^{-7} \text{ cm}^2}{9,87}]$$

= 0,0182 [cP<sup>++</sup>] dynamische Viskosität der Luft bei 20°C

l = Länge des Korns [cm]

F = Querschnittsfläche des Korns [cm<sup>2</sup>]

$\frac{V}{t} = Q$  = Volumendurchfluß pro Zeit bei Atmosphärendruck  
[cm<sup>3</sup>/sec]

p<sub>L</sub> = Luftdruck [atm]

p<sub>1</sub>; p<sub>2</sub> = Luftdruck vor bzw. hinter dem Kern [atm]

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

$$\bar{p} = p_1 - \Delta \frac{p}{2} = \text{Druck im Mittelpunkt des Korns} [atm]$$

Rechnet man atm in bar um, ist mit dem Faktor 0,987 zu multiplizieren.<sup>+++</sup>

-----

+ gilt für unpolare Flüssigkeiten, daher die Bezeichnung  $K_F$

++ empfohlene neue Dimension mPas . s (nach DIN 1342)  
( Millipascal Sekunden)

+++ 1,0133 bar = physikalische Atmosphäre [atm]

Die Einheit der Permeabilität K ist das sogenannte Darcy (1d = 1000 md)

$$1d = \frac{10^{-2} \text{ dyn s/cm}^2 \cdot \text{cm}^3/\text{s}}{\text{atm/cm} \cdot \text{cm}^2} = 0,987 \cdot 10^8 [\text{cm}^2]$$

Der in der Literatur oft gebrauchte Durchlässigkeitsbeiwert k steht zu K in folgender Beziehung:

$$K = k \cdot \frac{\eta}{\rho \cdot g} = k \cdot \frac{v}{g} \quad [\text{cm}^2] \quad (\text{Gleichung 18})$$

k hat die Dimension einer Geschwindigkeit [cm/sec]

v = kinematische Viskosität [cm<sup>2</sup>/sec]

g = Erdbeschleunigung 9,81 [cm/sec<sup>2</sup>]

ρ = Dichte [g/cm<sup>3</sup>]

η = dynamische Viskosität [cP]

#### 4.3.2 Einfluß der Gleitströmung

Wie schon oben erwähnt, gilt die Darcy-Gleichung nur unter bestimmten Bedingungen.

Nach KLINKENBERG (1941) ist beim Durchfluß von Gasen durch poröse Medien die sogenannte Gleitströmung zu beachten, welche um so stärker in Erscheinung tritt, je kleiner die Poren werden; sie ist mit der KNUDSON-Diffusion zu vergleichen.

Dieses Gleiten des Gases an der Porenwandung wird nach KLINKENBERG durch folgende Formel wiedergegeben:

$$K_L = K_F \cdot \left(1 + \frac{b_f}{p}\right) \quad (\text{Gleichung 19})$$

wobei  $K_F$  die Permeabilität für eine ideale Flüssigkeit darstellt.

$b_f$  ist ein Proportionalitätsfaktor, der vom mittleren Druck abhängig ist - da die Gleitströmung von der mittleren freien Weglänge der Moleküle des Gases abhängt, ist sie auch druckabhängig - und umgekehrt proportional ist zu einem "mittleren Porenradius". Dieser "mittlere Porenradius" bezieht sich auf ein vereinfachtes Porenmodell, so daß die Aussage nur qualitativ gelten kann.

Der Einfluß der Gleitströmung kann an der Steigung der Geraden im System  $K_L/K_F$  bzw.  $K_F$  gegen  $\frac{1}{p}$  abgelesen werden (Abb. 22, 25, 26) und wird umso größer, je geringer die Permeabilität ist.

RIECKMANN (1970) und andere amerikanische Autoren fanden aus ihren Messungen für  $b_f$  einen mittleren Wert in Abhängigkeit von der Permeabilität:

$$b_f = 0,50 \cdot K_L^{-0,37} \quad (\text{Gleichung 20})$$

$$\text{bzw. } b_f = 0,777 \cdot K_L^{-0,39} \quad (\text{Gleichung 21})$$

TIETZE (1973) gibt für die KLINKENBERG-Korrektur für verschiedene Permeabilitäten näherungsweise folgende Werte an:

| $K_L$ (md) | Korrektur (%) |
|------------|---------------|
| 100        | -10           |
| 10         | -20           |
| 1          | -30           |
| 0,1        | -40           |

Bei voll ausgebildeter KNUDSON-Diffusion ist der Durchfluß  $\sim 11$  mal größer als bei normaler laminarer Strömung. Der Übergangsbereich befindet sich etwa bei  $r = 0,2$  bis  $0,3 \lambda$

$r$  = Kapillarradius [cm]

$\lambda$  = mittlere freie Weglänge der Moleküle [cm]

Quantitativ läßt sich dieses Phänomen so deuten, daß bei der molekularkinetischen Gastheorie

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot N m_g u \lambda \quad (\text{Gleichung 22})$$

der Druck nicht berücksichtigt wird.

$\eta$  = dynamische Viskosität [cP]

$N$  = Anzahl der Moleküle pro  $\text{cm}^3$

$m_g$  = Molekulargewicht [g]

$u$  = mittlere Geschwindigkeit der Moleküle [cm/s]

So nimmt zwar  $N$  mit fallendem Druck ab,  $\lambda$  aber zu, so daß bis zu einer bestimmten Grenze, die durch den Kapillarradius gegeben ist, das Produkt  $N \cdot \lambda$  konstant bleibt. Ab dieser Grenze kann  $\lambda$  bei abnehmendem  $N$  nicht mehr vergrößert werden, und  $\eta$  nimmt ab.

#### 4.3.3 Einfluß der Turbulenz

Bleibt man bei den Versuchen im Bereich geringer Geschwindigkeiten, so gilt das vereinfachte Gesetz nach Darcy.

Bei nicht mehr stationärer Strömung muß man das quadratische Glied berücksichtigen, denn dann beginnen die Trägheitskräfte zu wirken: Es setzt Turbulenz ein in kleinen und dann zunehmend in größeren Poren, bis der gesamte Porenraum erfaßt ist. Bei den untersuchten Sandsteinen gibt es verständlicherweise keine fest definierte kritische Reynolds'sche Zahl, nur ein Übergangsfeld. Turbulente Strömung ist dann voll ausgebildet, wenn in Gleichung 16  $m = 1$  wird.

Neben anderen Autoren fand DACHLER (1936) aufgrund von Versuchen, daß die Konstanten  $a$  und  $b$  in der Gleichung  $J = av + bv^2$  von der kinematischen Viskosität und von den Struktureigenschaften der Poren abhängig sind (Porenverteilung - Porenform - Rauigkeit der Mineralkörner).

Folglich gelangten mehrere Autoren bei ihren Messungen zu unterschiedlichen Ergebnissen:

| aus LUDEWIG 1967 Material |                         | Korngröße | krit. Reynolds'sche<br>Zahl |
|---------------------------|-------------------------|-----------|-----------------------------|
| CHARDABELLAS              | Sand                    | 0,2-1,2mm | 5                           |
| SCHAFFERNAK u.<br>DACHLER | Kies                    | 2,0-6,5mm | 3-6                         |
| SCHEKACEV                 | (genaue Angaben fehlen) |           | 1-12                        |

Weitere Autoren, die sich mit diesem Problemkreis auseinandersetzen, sind bei LUDEWIG (1967) und VALENTIN (1970) aufgeführt.

#### 4.3.4 Kurzbeschreibung der Meßapparatur für Luft

Die Druckluft wird von einem Kompressor erzeugt (max. 15 atm), durch ein Filter gereinigt und getrocknet, bevor sie in den Meßteil eintritt.

Mit einem Druckregler kann der Absolutdruck vor dem Kern von 1 bis 5 atm eingestellt werden (Genauigkeit  $\pm 5 \cdot 10^{-3}$  atm). Die beiden Differenzdruckmesser (Wasser- u. Quecksilbermanometer) sind mit einer Genauigkeit von 0,0001 atm bzw. 0,001 atm abzulesen. Die Messung der Durchflußmenge Q kann je nach Bedarf mit 3 verschiedenen Rotametern erfolgen ( $0,03 \text{ cm}^3/\text{sec}$  bis  $2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ).

Um den apparativen Fehler möglichst auszuschalten, ist es notwendig, im oberen Meßbereich des einzelnen Rotameters zu messen. Alle Druckluftleitungen sind fest montiert und haben einen Innendurchmesser von 6 mm, so daß die auftretenden Luftgeschwindigkeiten eine Reynolds'sche Zahl  $Re \sim 150$  bedingen (Turbulenz beginnt erst bei  $Re \sim 1200$ ).

Aus den Meßbereichen der Instrumente und den Leitungs- und Ventilabmessungen ergibt sich für die verwendete Apparatur ein Meßbereich für  $K_F$  von ca.  $10^{-2}$  bis ca.  $10^4$  md.

#### 4.3.5 Meßvorgang

Die zylinderförmigen Gesteinsproben von 3 cm Länge und 3 cm Durchmesser wurden 24 Stunden bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet und im Exsikkator abgekühlt. Temperatur und Luftdruck

im Labor wurden vor und nach jeder Messung abgelesen. Nach Einbau der Probe in die Einspannvorrichtung wurde der Druck vor der Probe in 6 verschiedenen Stufen (1,1 - 1,4 - 1,8 - 2,5 - 3,5 - 5,0 atm Absolutdruck) erhöht und abgewartet, bis sich der entsprechende Differenzdruck eingestellt hatte. Lag der Differenzdruck über 0,08 atm (Maximalwert des Wassermanometers), wurde mit Hilfe des Quecksilbermanometers weitergemessen. Für Druckdifferenzen über 0,8 atm wurde auch dieses geschlossen, ebenso das Feinregelventil. Durch Öffnen des Durchgangsventils konnte dann gegen den Atmosphärendruck gemessen werden. Dadurch konnte je Druckstufe nur 1 anstatt 4 Q-Werte gewonnen werden, so daß die gering durchlässigen Proben (bis ca. 10 md) mit einem geringen Fehler behaftet sind. Die gemessenen Werte wurden auf Lochkarten übertragen und in der EDV-Anlage ausgerechnet, wobei im Programm eine Temperatur- und Druckkorrektur (keine Gerade!) mit berücksichtigt wurde. Zur Bestimmung des systematischen Fehlers wurden 2 Proben vermessen. Es ergab sich aus jeweils 5 Messungen eine Standardabweichung von  $\pm 0,6 \%$  bzw.  $\pm 0,4 \%$ .

#### 4.3.6 Die Darstellung der Meßwerte

Die von RIECKMANN (1970) entwickelte Methode, bei der  $K_L/K_F$  gegen  $\frac{1}{p}$  aufgetragen wird (Abb. 22), zeigt beim Abknicken der Geraden den Einsatz der Turbulenz an. An der zunehmenden Steilheit ist der Einfluß des KLINKENBERG-Effektes zu erkennen.

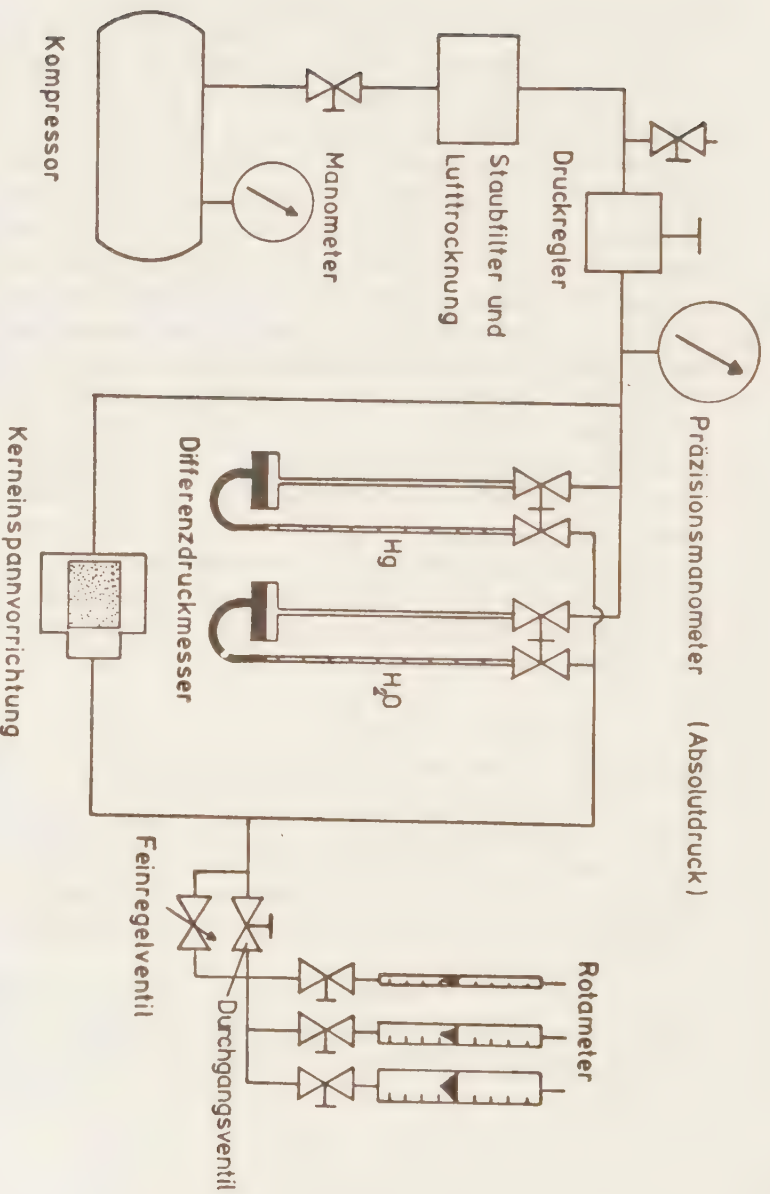


Abb.22 Halbschematische Darstellung der Permeabilitätsapparatur für Luft

Demgegenüber wurde in Zusammenarbeit mit Herrn TIETZE diese Methode so verändert, daß nicht  $\bar{p}$  gegen  $K_L$  gemessen wurde, sondern verschiedene Durchflußmengen  $Q$  gegen  $\bar{p}$ . Dieses Verfahren bringt den Vorteil, daß die Meßpunkte im Koordinatensystem  $\bar{p}/K_F$  eine Gerade ergeben. Die Werte mit dem höchsten  $K_L$  kommen dann der idealen Strömungsbedingung am nächsten (Abb. 24). Diese Punkte werden durch eine Gerade verbunden und bis  $\frac{1}{p} = 0$  extrapoliert (Abb. 25 u. 26).

Durch diese graphische Lösung werden zugleich 3 Fehlerquellen eliminiert:

1. Durch Steigerung der Durchflußmenge ( $Q$ ) in mehreren Stufen, kann davon die geeignetste ausgewählt werden, die einerseits den apparativen Fehler möglichst gering hält, andererseits kann das Einsetzen der Turbulenz festgestellt werden (Abb. 24).
2. Anhand der Steigung der Geraden ist der Einfluß des KLINKENBERG-Effekts zu erkennen, der durch Messung bei mehreren Druckstufen und Extrapolation auf  $p = \infty$  ausgeschaltet wird.
3. Bei diesem Extrapolationsverfahren steht die Luft unter unendlich hohem Druck, wodurch  $K_L$  gleich  $K_F$  wird, d.h. die Luft nimmt die Eigenschaften einer idealen Flüssigkeit an (daher der Index F).

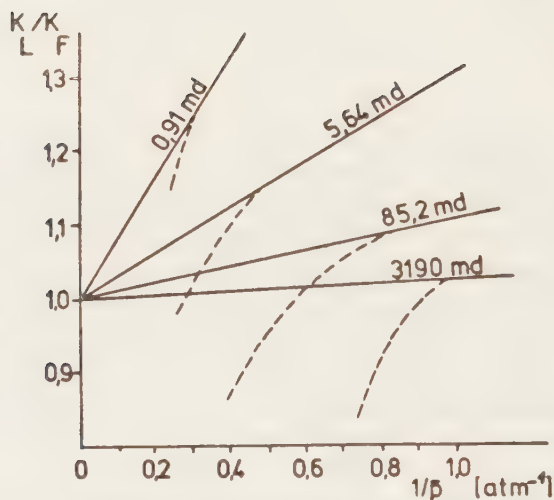
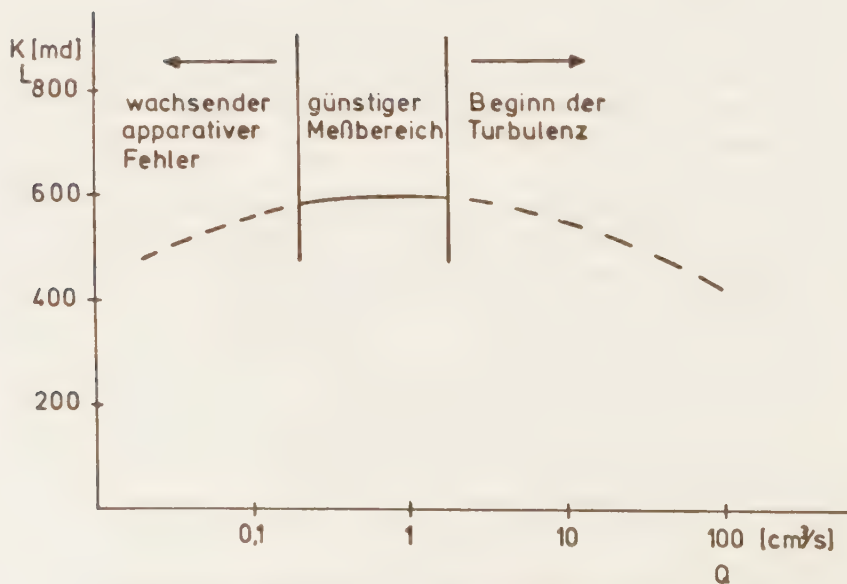
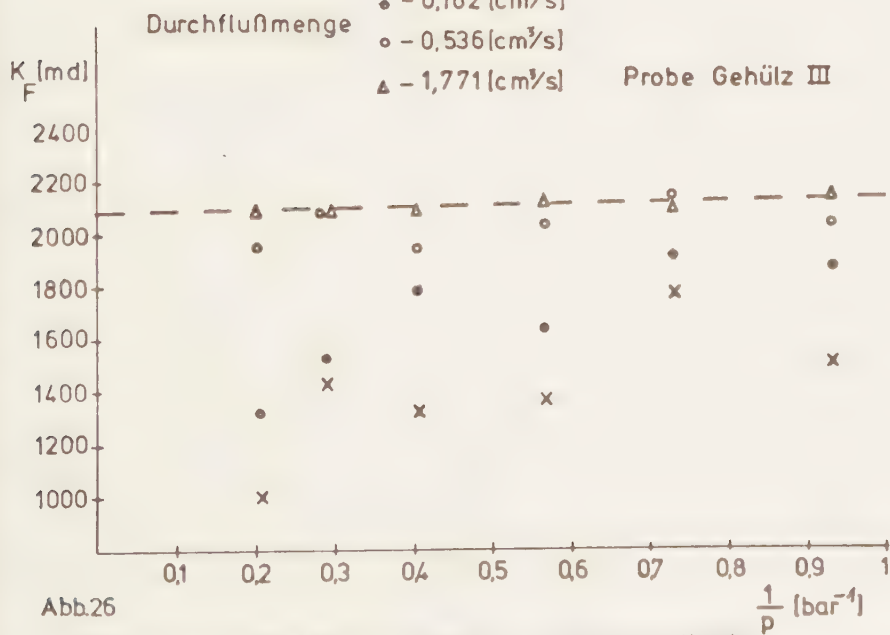
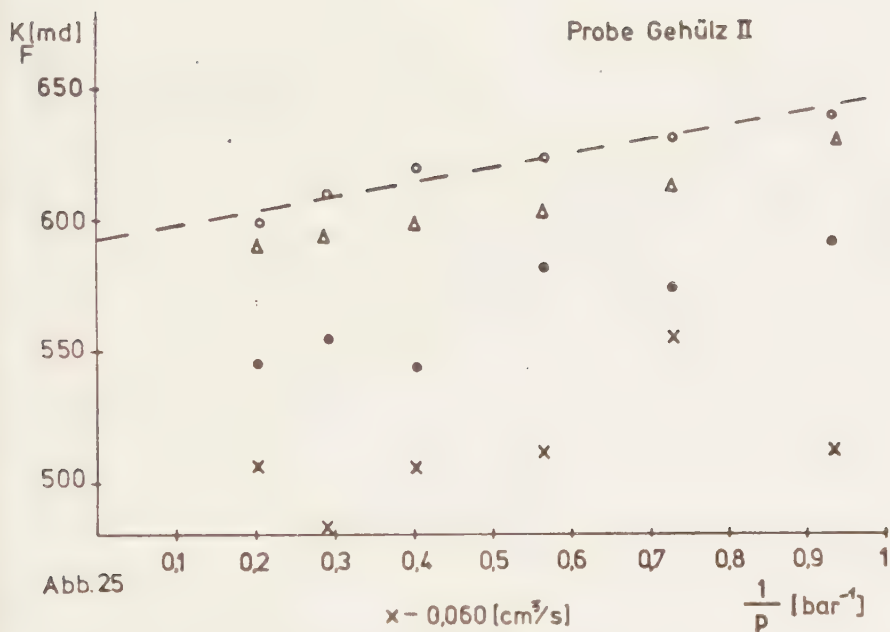


Abb.23 Zunehmender Einfluß der Gleitströmung bei abnehmender und zunehmender Einfluß der Turbulenz bei zunehmender Permeabilität (nach RIECKMANN)



Einfluß von Turbulenz und apparativem Fehler auf die Meßbedingungen

Abb.24



Beispiele zur Bestimmung von  $K_F$  mit Hilfe optimaler  
Meß- und Strömungsbedingung

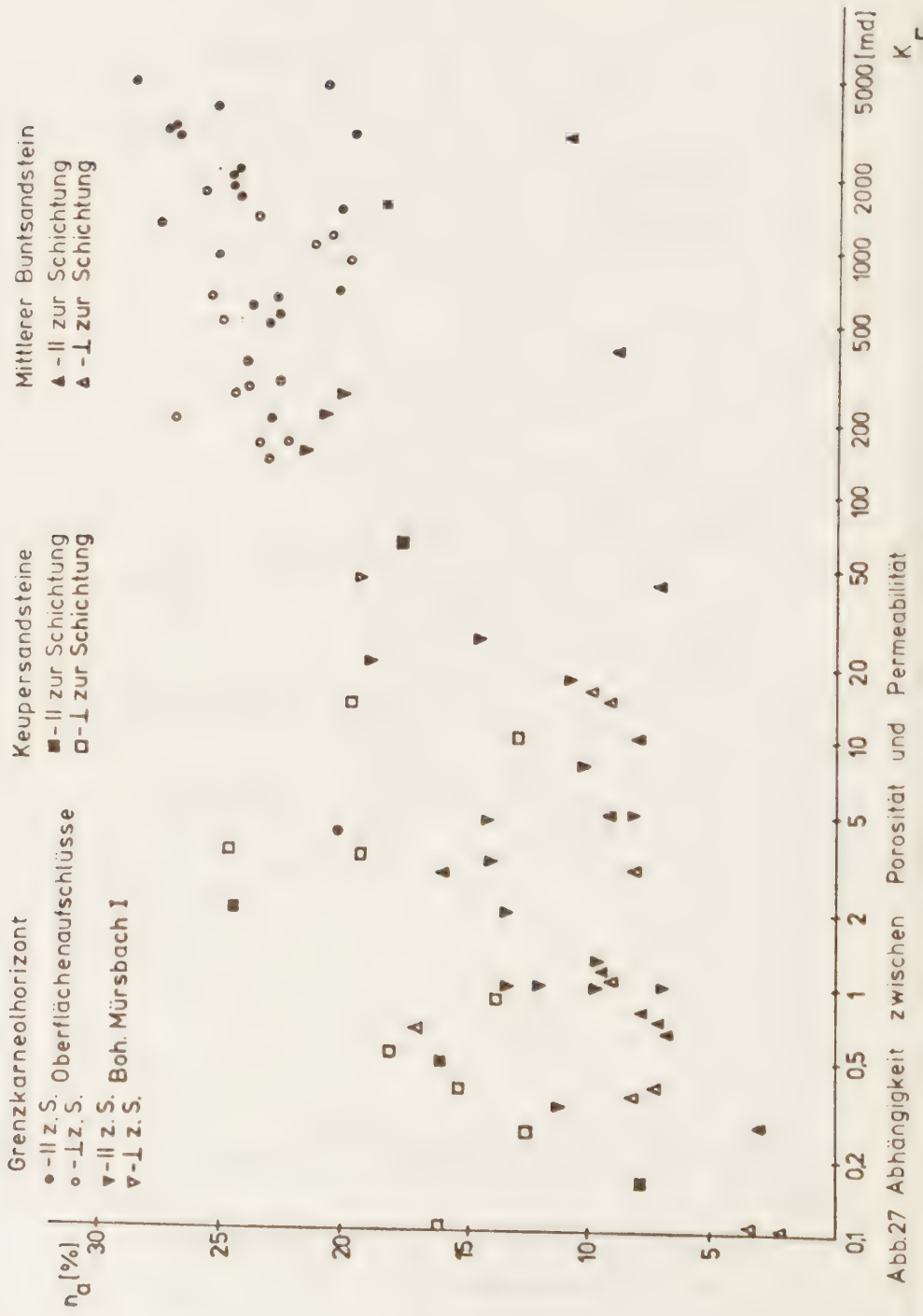


Abb.27 Abhängigkeit zwischen Porosität und Permeabilität

#### 4.3.7 Abhängigkeit der absoluten Permeabilität von der Porosität

---

Aus einer oberflächlichen Betrachtung der Abb. 27 ist - betrachtet man alle Punkte - zu entnehmen, daß sich eine grobe Abhängigkeit zwischen  $n_a$  und  $K_F$  andeutet. Die Extremwerte aber schwanken bei Proben von ca. 3000 md Durchlässigkeit zwischen 10 % und 27 % Porenvolumen. Umgekehrt können Proben von 20 % Porosität einen Wert von 5 md bis 4000 md aufweisen. Die im Großen gegebene Abhängigkeit Porosität-Permeabilität trifft also im einzelnen nicht zu.

Da die Porengröße für  $K_F$  im Gegensatz zu  $K_W$  (vergl. MÜLLER 1972) nicht oder kaum von Einfluß ist, bestimmt bei gleicher Porosität die Porenform bzw. der Anteil an Poren die nicht vom Durchfluß erfaßt werden, die Lage der Punktwolken für die einzelnen Gesteine im Diagramm der Abb. 24. Die Auswirkungen der Diagenese sind dennoch von viel größerer Bedeutung als die primäre Kornzusammensetzung. Es lassen sich bereits aus einer Gegenüberstellung der einzelnen Gesteinsgruppen die unterschiedlichen Porenformen und ihre Verbindungskanäle erkennen und einiges über die Porenverteilung abschätzen. Dabei besitzen zum Beispiel die Keupersandsteine wegen ihrer relativ hohen Porosität und ihrer geringen Durchlässigkeit viele Poren, die nicht vom Durchfluß erfaßt werden, und ihre Abhängigkeit von horizontaler und vertikaler Durchlässigkeit ist nicht besonders ausgeprägt. Tatsächlich handelt es sich bei diesem Gesteinstyp um einen wenig geschichteten feinsandigen bis schluffigen Sandstein. Die genaue petrographische Beschreibung dazu wird von SCHMITT gegeben werden.

Trotz der geringen Porosität der Proben aus dem Mittleren Buntsandstein (2 % - 16 %) können diese eine Permeabilität von mehr als 2000 md aufweisen, d.h. die wenigen Poren,

die dem fließenden Medium zur Verfügung stehen, werden auch durchströmt und zwar bevorzugt in Schichtungsrichtung. Auch in diesem Fall stimmen die Meßergebnisse mit den theoretischen Überlegungen zur Porenstruktur und Porenverteilung weitgehend überein. Bei diesen Proben aus dem Mittleren Buntsandstein handelt es sich um stark quarzitisch verfestigten Sandstein, der bevorzugt in Schichtungsrichtung von millimeterstarken porösen Lagen durchsetzt ist.

BITTERSOHL wird dazu die Petrographie und Genese dieser Sandsteine ausführlich beschreiben. An dieser Stelle soll besonders am Beispiel der Proben von Oberflächenaufschlüssen und aus Bohrproben aus Mürsbach I des Grenzkarneolhorizontes auf die Porenentstehung geschlossen werden.

Legt man gleiche Korngröße und gleichen Ungleichförmigkeitsgrad zugrunde, wie es auch näherungsweise der Fall ist, so ist der Unterschied in der Porosität durch die unterschiedliche Zementation der Proben zu erklären. Da das karbonatische und sulfatische Bindemittel in den Proben der Oberflächenaufschlüsse fehlt, ist mit Sicherheit dieser Unterschied auf die sekundäre Lösung dieser Zementeinlagerungen zurückzuführen. Das kontinuierliche Ansteigen der Permeabilität mit der Porosität läßt weiter den Schluß zu, daß sich im allgemeinen mit steigender Porosität keine großen Blindporen bilden, sondern die Verbindungskanäle zwischen den Poren erweitern. Im Einzelfall können an den Proben von der Erdoberfläche bis zu einem bestimmten Grad Differenzierungen in der Porenbildung durch Auslaugen erkannt werden. Teils entstehen kleinere Blindporen, die nicht mehr durchflossen werden, teils bilden sich dadurch allgemein größere Porenverbindungen und damit höhere Permeabilität bevorzugt parallel zur Schichtungsrichtung.

#### 4.4 Durchlässigkeit für Wasser

Die absolute Permeabilität, die mit Luft gemessen wird, gibt genau bestimmbare Werte, da die störenden Faktoren wie apparativer Fehler, Turbulenz und KLINKENBERG - Effekt eliminiert werden können. Diese Werte geben dem angewandt tätigen Geologen exakte Vergleichswerte im Durchlässigkeitsverhalten verschiedener Gesteine. Der Praktiker in der Hydrogeologie und Baugrundgeologie beschäftigt sich aber fast ausnahmslos direkt oder indirekt mit Wasser als strömendem Medium. Vor allem in feinporigem Material wie im Sandstein zeigen sich größere Abweichungen von den Meßwerten der absoluten Permeabilität. Um diese Einflüsse in ihrer Größe zu erfassen, wurde an denselben Kernen neben der Durchlässigkeit für Luft auch die für Wasser gemessen.

Die Messapparatur (siehe Schemazeichnung) besteht aus einer wassergefüllten Druckzelle, einem Behälter für entlüftetes Wasser und einem Messgefäß. Für den Umschließungsdruck in der Druckzelle und den Durchströmungsdruck sorgt eine Preßluftflasche. Die einzelnen Druckstufen können an Reduzierventilen eingestellt und an den entsprechenden Manometern abgelesen werden.

Meßvorgang: Die Probe wird mit einer Gummimanschette umgeben und zusammen mit einer unteren und oberen Siebplatte in eine Druckzelle eingebaut. Durch Anlegen eines Druckes (4,5 atü) in dieser Zelle wird die Gummihülle fest an das Gestein gedrückt, was ein Vorbeiströmen des Wassers an der Probe verhindert. Für die einzelnen Messungen wird dann in 3 Stufen (1,1 - 1,5 - 2,0 atü) entlüftetes Wasser durch den Kern gedrückt und die Menge pro Zeit im Meßzylinder gemessen. Die Meßgenauigkeit am Manometer betrug 0,0 atü, und die durchgeflossene Wassermenge konnte mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5 \text{ cm}^3$  bestimmt werden.

An dieser Stelle soll auf ein Phänomen hingewiesen werden, das es zu beachten gilt. Beim Tränken eines Kerns mit unterschiedlich dicken Porenkanälen kann infolge der größeren Kapillarität bei kleinen Poren das Wasser in diese schneller eindringen und so eine größere Pore umgangen werden. Dieser Effekt führt zum Einschluß von Luftblasen und zum Blockieren der Fließwege. Um dies möglichst auszuschalten, muß der Kern vor dem Anlegen des Durchströmdruckes evakuiert werden.

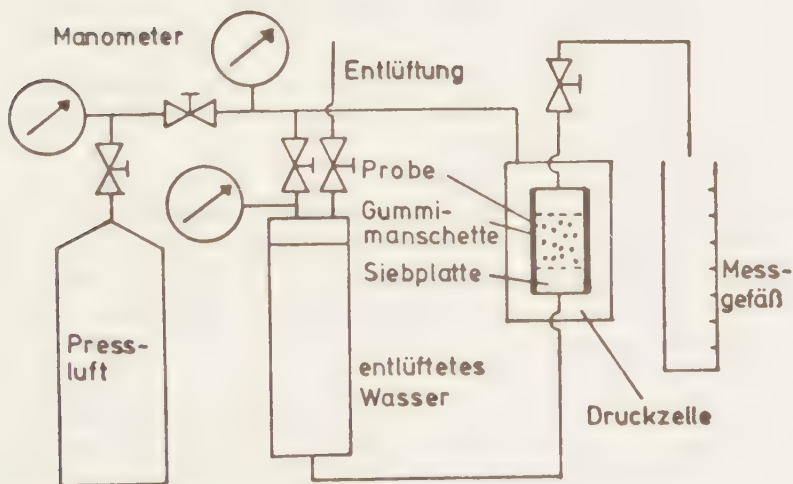
Der Einfluß der Temperatur konnte weitgehend durch Konstanthalten bei  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,7^{\circ}\text{C}$  ausgeschaltet werden. Diesen Einfluß gilt es zu berücksichtigen, wenn man von den Labormessungen auf Fließvorgänge im natürlichen Grundwasserleiter schließen möchte. So nimmt die dynamische Viskosität zwischen  $0^{\circ}$  und  $20^{\circ}\text{C}$  von 1,808 cP auf 1,008 cP ab. (Umgekehrt ist das Verhalten der Gase).

Inwieweit beim Messvorgang Turbulenzerscheinungen auftraten, konnte aus messtechnischen Gründen nicht verfolgt werden. Bei Untersuchungen dieser Zusammenhänge, die KLOTZ (1971) an Kiesklebefiltern durchführte, konnte das erste Auftreten von turbulenter Strömung bereits bei Filtergeschwindigkeiten von 0,008 cm/s nachgewiesen werden. Diese Filter entsprechen in ihrer Struktur schwach verfestigten groben Sandsteinen. Bei den gemessenen Sandsteinen lagen die Werte für die Filtergeschwindigkeit maximal bei 0,74 cm/sec., wodurch auch bei diesen Messungen auf turbulente Strömung zu schließen ist und die Werte mit einem gewissen Fehler behaftet sind.

Die von v. ENGELHARDT & TUNN (1954) gewonnenen Meßwerte über die Abhängigkeit der Durchflußgeschwindigkeit vom Mineralisationsgrad des Wassers zeigen auf, daß nur bei hohen Ionenkonzentrationen eine Korrektur nötig ist.

Für meine Versuche wurde Münchner Leitungswasser verwendet, das durchschnittlich 420 mg/l Salze enthält. Dadurch wird dieser Einfluß vernachlässigbar klein.

Lösungswirkungen und Quellen von Tonmineralen, die den Porenradius entsprechend verändern könnten, dürfen außeracht gelassen werden. Das geht aus dem schnellen Erreichen einer konstanten Durchflußmenge nach wenigen Minuten hervor. Außerdem zeigt sich aus den mikroskopischen Beobachtungen, daß Tonminerale und leicht lösliche Salze, zumindest in den Oberflächenaufschlüssen, nur untergeordnet vorkommen. Demgegenüber üben die Wechselwirkungen zwischen Wasser und Porenwand entscheidenden Einfluß auf die Fließbedingungen aus (s. Kap. 4.6.).



Permeabilitätsapparatur für Wasser (schematisiert)

Abb. 28

#### 4.5 Permeabilitätsanisotropie

Um den Zusammenhang von Durchlässigkeit und Schichtung zu klären, wurde aus 28 Handstücken je eine Probe in c-Richtung (senkrecht zur Schichtung) und eine Probe in a-Richtung (parallel zur Schichtung) gebohrt und auf ihre Permeabilität ( $K_F$ ) nach oben genannter Methode (Kap. 4.3.5) untersucht.

In Anlehnung an DURBAUM (1969) ist im Diagramm 23 die Differenz  $K_{\parallel} - K_{\perp}$  gegen  $\frac{K_{\parallel} + K_{\perp}}{2}$  aufgetragen. Aus dieser Zusammenstellung geht folgendes hervor:

- Bei den wenig permeablen feinkörnigen Keupersandsteinen liegen die Verhältnisse ( $K_{\parallel}$  zu  $K_{\perp}$ ) bei 3:1 und 3:2.
- Bei den Proben des Mittleren Buntsandsteins zeigt sich ebenfalls ein deutliches Anisotropieverhalten. Über den gesamten Meßbereich läßt sich keine Tendenz von Anisotropieänderung in Abhängigkeit von der Permeabilität erkennen.
- Bei den Messungen an den Proben des Karneolhorizontes zeigt sich ein zunehmendes Auseinanderrücken von  $K_{\parallel}$  und  $K_{\perp}$  mit steigender Permeabilität.

Von den 28 gemessenen Wertepaaren ergaben 3 Messungen ein umgekehrtes Verhältnis ( $K_{\perp} > K_{\parallel}$ ). Diese 3 Werte konnten im Diagramm nicht erfaßt werden. Bei einer Probe lag die Ursache an einer feinen Kluft; bei 2 Kernproben konnte keine Erklärung dafür gefunden werden.

Der Zusammenhang entsprechender Werte mit den petrographischen Daten der Keupersandsteine und den Proben aus dem Mittleren Buntsandstein wird von SCHMITT bzw. BITTERSOHL näher beschrieben werden.

Es soll jedoch darauf hingewiesen werden, daß selbst bei Korngrößen im Feinsand- und Schluffbereich (Keuper) und bei unterschiedlich starker Zementation (Mittlerer Buntsandstein) noch eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit vorhanden ist.

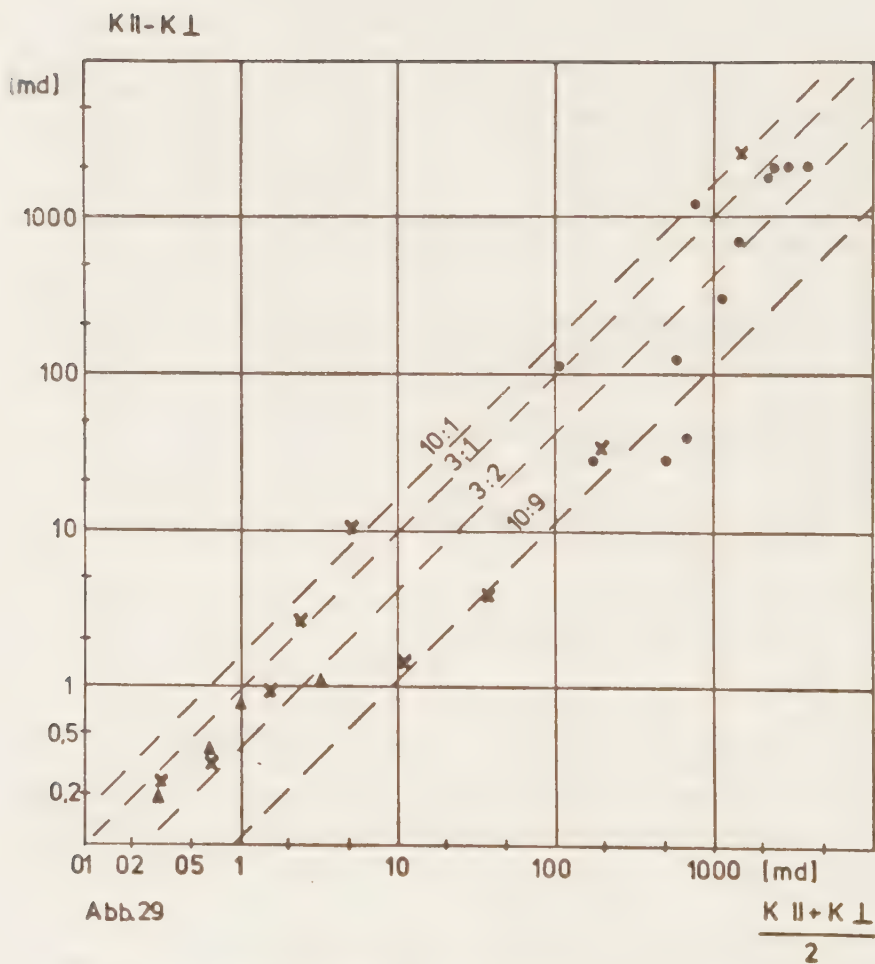
Bei der Diskussion der Ergebnisse muß berücksichtigt werden, daß die Werte zwar aus demselben Handstück gewonnen wurden, jedoch nicht vom selben Kern. Aus meßtechnischen Gründen konnten die Messungen nur an zwei verschiedenen zylinderförmigen Kernen durchgeführt werden und nicht an Würfeln, wie es für exakte Werte nötig wäre (RÜHL & SCHMID 1957).

Die Probe muß umso größer sein, je inhomogener das Gestein wird (z.B. Proben des Mittleren Buntsandsteins). Um dies zu erfassen, wurden aus einem Gesteinswürfel von ca. 25 cm Kantenlänge je 4 (2) Kerne parallel und 5 (2) senkrecht zur Schichtung herausgebohrt.

Es ergaben sich dabei folgende Werte:

Tabelle 4

| <u>Gehülz</u> |                      |       |                  | <u>Kronach</u> |                      |       |                  |
|---------------|----------------------|-------|------------------|----------------|----------------------|-------|------------------|
| Probe         | $K_F \parallel$ [md] | Probe | $K_F \perp$ [md] | Probe          | $K_F \parallel$ [md] | Probe | $K_F \perp$ [md] |
| I             | 480                  | V     | 139              | I              | 1800                 | III   | 1350             |
| II            | 594                  | VI    | 176              | II             | 1670                 | IV    | 650              |
| III           | 2060                 | VII   | 245              |                |                      |       |                  |
| IV            | 2500                 | VIII  | 256              |                |                      |       |                  |
|               |                      | IX    | 315              |                |                      |       |                  |
| Mittelwert    | 1408,5               |       | 226,2            | Mittelwert     | 1735                 |       | 1000             |



— — — Linien gleicher Verhältnisse  $K_{\parallel} : K_{\perp}$

- ▲ Keupersandsteine
- × Mittlerer Buntsandstein
- Grenzkarneolhorizont

Einerseits zeigen diese Werte eine große Streuung, wodurch sich bei nur 2 Proben je Handstück auch einmal ein umgekehrtes Verhältnis erklären läßt (siehe oben). Andererseits fällt die Differenz zwischen  $K_F \parallel$  und  $K_F \perp$  so deutlich aus, daß auf eine allgemeine Permeabilitätsanisotropie des gesamten Gesteinskörpers geschlossen werden muß.

Im Gegensatz zu RUHL & SCHMID (1957), die in Erdöl-speichergesteinen mit steigender Permeabilität geringer werdende Differenzen feststellten, konnte bei vorliegenden Proben (Grenzkarneolhorizont) der umgekehrte Effekt beobachtet werden.

Das Anwachsen der Differenz beider Werte mit steigender Durchlässigkeit läßt sich dadurch erklären, daß das primär bei der Sedimentation bereits angelegte anisotrope Verhalten der Pegasamkeit im Gestein noch verstärkt wurde durch Lösung von Zementmaterial.

#### 4.6 Die Strömung des Wassers in den Poren

In den vorhergehenden Kapiteln wurde gezeigt, wie sich Wasser und Luft in ihren Strömungsbedingungen verhalten und welche Fehlerquellen zu beachten sind. Aufgrund dieser Untersuchungen und theoretischer Überlegungen lassen sich 4 Bereiche der Fließbedingungen ausgliedern:

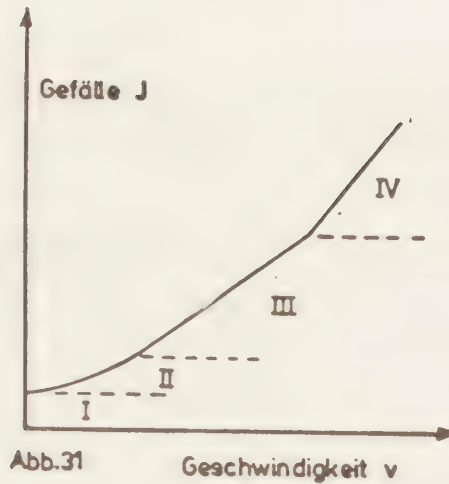
Bereich I: Bei geringem Gefälle  $J$  wird das Wasser noch nicht fließen, wenn es sich um genügend kleine Poren handelt, da das gesamte Wasser als gebundenes Wasser vorliegt (Definition s. Kap. 4.6.1).

Bereich II: Bei weiterem Erhöhen des Gefälles wird sich ein schnelles Anwachsen der Geschwindigkeit bemerkbar machen. In dieser Phase werden entsprechend ihrer Spannung die lose gebundenen Wassermoleküle "abgeschert" (Definition s. Kap. 4.6.1).

Bereich III: Bei weiterem kontinuierlichen Erhöhen des Gefälles gelangt man zu dem Punkt, an dem keine Wassermoleküle von der Feststoffoberfläche mehr losgerissen werden können und sich ein konstanter Durchflußquerschnitt einstellt. Herrscht in dieser Phase dazu laminares Strömen, läßt sich das Darcy-Gesetz anwenden und es ist das Gefälle proportional der Geschwindigkeit.

Bereich IV: Durch Übergang in Turbulenz erfolgt dann eine etwas geringere Geschwindigkeitszunahme mit steigendem Gefälle.

In einem natürlichen Sandstein können nebeneinander alle 4 Phasen gleichzeitig vorliegen. Während in den Mikroporen (ca. 10  $\mu\text{m}$ ) noch keine Strömung herrscht, kann bereits in den weiten Kanälen Turbulenz auftreten. Ebenso können ganze Bereiche ausfallen je nach Größe und Struktur des Hohlraums. Diese Bedingungen gelten nicht bei Wasserbewegungen außerhalb des Grundwassers, da hier - im Dreistoffsystem Luft-Wasser-Boden - noch Kapillarkräfte hinzutreten.



#### 4.6.1 Beziehung Wasser-Sediment

Nähert sich der Porenradius dem  $\mu\text{m}$ -Bereich, so gewinnt der an Festkörper haftende Wasserfilm auf den Fließquerschnitt immer mehr Einfluß. Dieser komplizierte Zusammenhang und seine Auswirkungen auf die Meßergebnisse sollen in folgenden näher untersucht werden.

Die in der Literatur nicht selten verwendeten Begriffe "Häutchen- und Porenwinkelwasser" sollen durch präzise Definitionen und eine kurze physikalische Erklärung der Phänomene ersetzt werden.

Zunächst lagert um das Sedimentteilchen, in diesem Fall das Sandkorn, das hygroscopische Wasser oder fest gebundene Wasser. Es ist durch elektrochemische oder molekular-elektrische Kräfte so fest gebunden, daß es durch mechanische Kraft nicht entfernt werden kann. Nach MAROTZ (1968) weist es eine Schichtdicke von  $2 \cdot 10^{-9}$  bis  $20 \cdot 10^{-9}$  m auf und ist stark verdichtet.

Am gesamten gebundenen Wasser hat es bei vorliegenden Sand-sedimenten einen Anteil von wenigen Prozent. Dieser Anteil kann bei Lehm bis zu 12 % ansteigen (Marotz 1968).

Darüber folgt eine Schicht von lose gebundenem Wasser, das durch orientierte Dipolmomente gebunden ist und die Viskosität einer hochmolekularen Flüssigkeit besitzt (liotrop, d.h. keine Newton'sche Flüssigkeit). Nach BUSCH & LUCKNER (1974) beträgt die Schichtdicke  $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ , nach BURJADOWSKIY (1960) liegt die obere Grenze bei  $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ . Erst über dieser Schicht geht das Wasser in den frei beweglichen Zustand über. Mit zunehmender Entfernung vom Sandkorn nimmt die Spannung kontinuierlich ab.

Nebestehende Abbildung zeigt den von BUSCH & LUCKNER angegebenen Spannungsverlauf mit abnehmender Entfernung.

Abb. 32



Verläßt man den Grundwasserspiegel, kommt man in den Bereich des kapillar gebundenen Wassers. Durch das Hinzutreten von Luft als 3. Phase macht sich die Oberflächenspannung bemerkbar, deren Verhältnis zur Porengröße die Kapillarität bestimmt.

Da meine Messungen im gesättigten Zustand durchgeführt wurden, tritt diese Kapillarität nicht in Erscheinung.

Ziel meiner Messungen war es hauptsächlich, den Einfluß des lose gebundenen Wassers in den untersuchten Sandsteinen zu ermitteln. Dazu wurde in Abb. 33 das Verhältnis  $K_W/K_F$  gegen  $K_F$  aufgetragen. Bis ca. 600 - 800 md liegen die Quotienten bei 0,1 und 0,2 und steigen dann bei 1000 md teilweise über 0,5 an. Die schnelle Abnahme der Spannung (Bindungskräfte) des Wassers spiegelt das steile Ansteigen der Quotienten wider. Die relativ weite Streuung der Werte liegt im geringen Ausmaß der Proben begründet, da sich eine einzige durchlässigere Pore auf den Wert entscheidend auswirken kann.

Weiter zeigt sich an den schlecht durchlässigen Kernen (unter 1 md), daß die Permeabilität bei feinkörnigen Sandsteinen nicht durch ein fortschreitendes Kleinerwerden aller Fließwege zustande kommt, sondern daß derartige Proben, wenn überhaupt durchlässig, nur einen oder ganz wenige größere Kanäle aufweisen (sekundäre Brüche, Lösungskanäle).

Als weiteren Hinweis, der eine Spannungsabnahme des gebundenen Wassers mit der Entfernung von der Kornoberfläche aufzeigt, bietet sich die Druckabhängigkeit von  $K_W$  an. Dazu folgende theoretische Überlegung: Vorausgesetzt es liegen sehr enge, ziemlich gleichmäßige Poren vor (etwa 1-5  $\mu\text{m}$ ), so bilden die Wasserfilme, die an den Porenwänden haften, über den Mittelpunkt des Fließkanals eine Art Brücke von gebundenem Wasser, so daß sich auch beim Anlegen eines größeren Gefälles der Fließquerschnitt nur wenig ändert bzw. der Fließvorgang auf wenige Poren beschränkt bleibt.

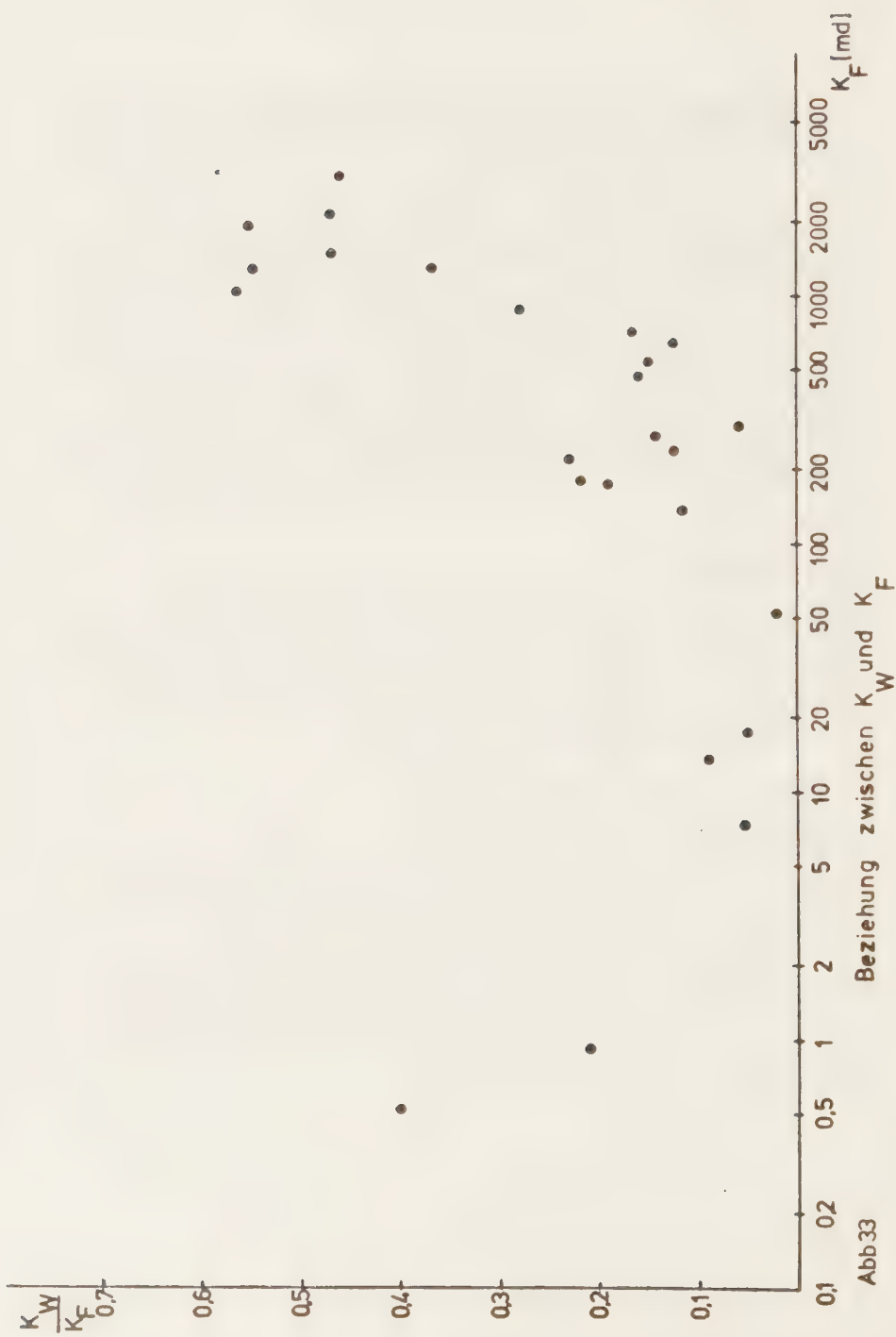
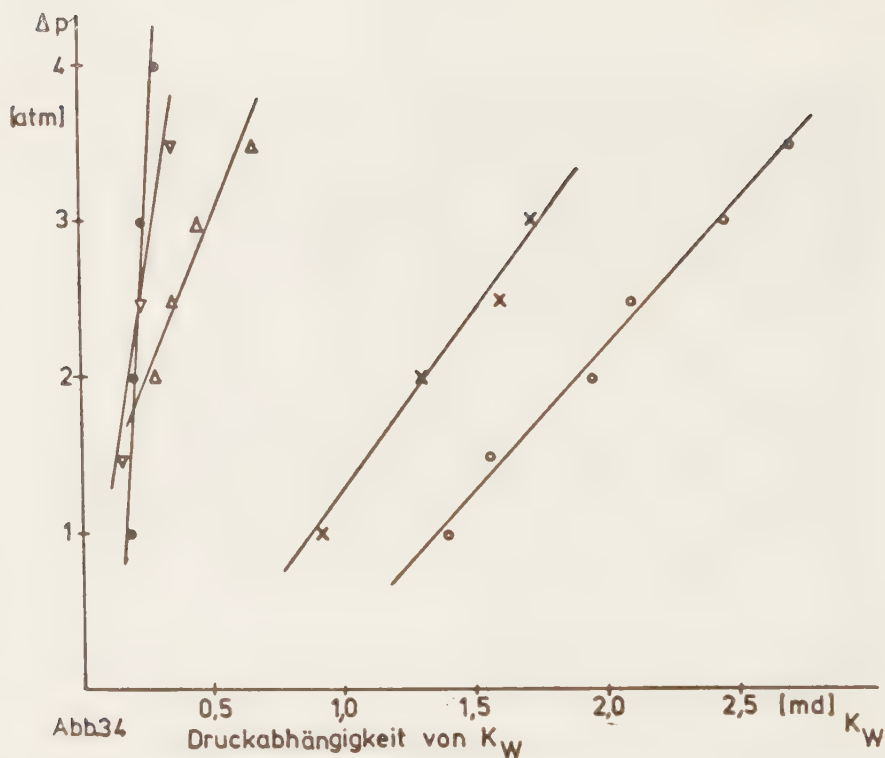


Abb33

Liegen größere Kanäle vor, ist das Wasser im Zentrum nicht mehr oder nur schwach gebunden, und die Haftkräfte des lose gebundenen Wassers können durch erhöhten Druck zunehmend überwunden werden. Der Druck bewirkt ein "Abscheren" von Wassermolekülen bzw. ein Öffnen der nächst kleineren Poren. Dadurch steigt die Durchflußmenge schneller als linear mit dem angelegten Druck.

Durch Steigerung der Druckdifferenz  $\Delta p$  in mehreren Stufen ergaben sich für die Durchlässigkeit  $K_w$  die in Abbildung 31 dargestellten Werte. Aus den Ergebnissen ist zu ersehen, daß mit steigender Durchlässigkeit und somit größerem Porenradius die Druckabhängigkeit größer wird ( $K_w$  also nicht konstant). Folglich läßt sich bei kleineren Porenradien eine festere Bindung des Wassers nachweisen.

Bei Werten unter 0,5 md sind die Poren so klein, daß das Wasser als gebundenes vorliegt. Bei größeren Radien dagegen nimmt der Einfluß des "freier beweglichen" Wassers zu, d.h. die Spanningskräfte können durch erhöhten Druck leichter überwunden werden.



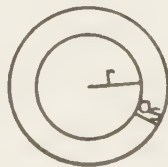
#### 4.6.2 Wirksamer Porenradius

Legt man die oben (Kap. 4.6.1) genannten Werte für die Schichtdicke des gebundenen Wassers zugrunde und geht von der vereinfachten Vorstellung kreisförmiger Fließquerschnitte aus, so ist es möglich, näherungsweise einen wirksamen Porenradius aus dem Verhältnis  $K_W/K_F$  zu errechnen.

Dabei geht man von folgender Überlegung aus:

$$\frac{\text{Fließquerschnitt des Wassers}}{\text{Fließquerschnitt der Luft}} = \frac{K_W}{K_F} =$$

$$= \frac{r^2 \pi}{\pi(r+a_s)^2} \quad (\text{Gleichung 21})$$



$$a_s = 5 \cdot 10^{-5} \text{ [cm]}$$

$$r^2 \pi = \text{Durchflußquerschnitt für Wasser [cm}^2\text{]}$$

$$(r+a_s)^2 \pi = \text{Durchflußquerschnitt für Luft bzw. für eine unpolare Flüssigkeit [cm}^2\text{].}$$

Setzt man für  $r+a_s$  den ermittelten mittleren Porenradius, gemessen mit der Quecksilberdruckmethode, so ergeben sich  $a_s$ -Werte zwischen 26 und  $63 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ . Diese Werte, die bis zu 10 mal größer sind, als von BUSCH & LUCKNER angegeben, ergeben sich vor allem aus der vereinfachten Annahme kreisförmiger Porenquerschnitte.

Da eine genaue mathematische Erfassung der Porenstrukturen und Fließquerschnitte nicht möglich ist und auch Modellrechnungen einen großen mathematischen Aufwand erfordern (BEAR 1972; SCHEIDEGGER 1960), soll an einfachen geometrischen Formen das Fließverhalten des Wassers erläutert werden.

Stellt man sich den Fließquerschnitt des Wassers als Kreisfläche vor, die in einer regelmässigen geometrischen Form als Porenquerschnitt eingeschrieben ist, so ergeben sich folgende Abhängigkeiten von Porenform und Fließquerschnitt:



21%



40%



38%



53%

Abb35

Verkleinerung einer Fläche durch einen einbeschriebenen Kreis  
(Fließquerschnitt)

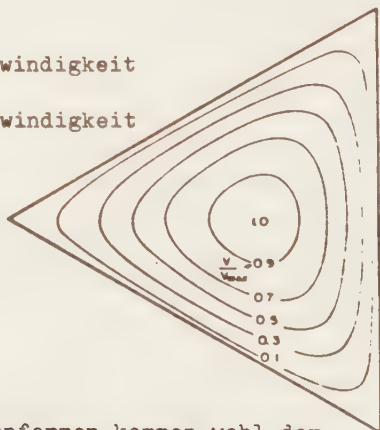
Daraus geht hervor, daß der Fließquerschnitt mit abnehmen-  
dem Winkel der Porenwände zueinander stark abnimmt.

Speziell für die geometrische Form des gleichseitigen Dreie-  
cks berechneten SINGHAL & SOMERTON (1970) die Geschwindig-  
keitsverteilung in der strömenden Flüssigkeit und kamen auf  
ein Verhältnis von

$$\frac{v_m}{v_{\max}} = 0,45$$

$v_m$  = mittlere Geschwindigkeit

$v_{\max}$  = maximale Geschwindigkeit



Die im Mikroskop beobachteten Porenformen kommen wohl der  
in Abb. 35d am nächsten, wodurch das Verhältnis  $v_m/v_{\max}$  noch  
verkleinert wird. Die absolute Porengröße und der Randwinkel  
beeinflussen diesen Wert zusätzlich.

## 5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, den Einfluß der verschiedenen Faktoren von Sedimentation und Diagenese auf die Bildung der Sandsteinporen zu erfassen. Neben Untersuchungen im Gelände wurden vor allem durch verschiedene optische Methoden und gesteinsphysikalische Messungen im Labor die Beziehung zwischen dem Gestein, seinen Poren und deren Wirkung auf die Porosität und Permeabilität festgestellt.

Als Beispiel wurde der oberfränkische Grenzkarneolhorizont im Gebiet um Kulmbach und Kronach und aus den Bohrungen Mürsbach I und III ausgewählt.

Als erstes sind die Sedimentationsbedingungen als porengestaltende Faktoren zu nennen. Dazu gehören Kornverteilung, Kornrundung, Korneinregelung, Mineralzusammensetzung und Schichtung. Eine scharfe Trennung von den Sekundäreinflüssen wie Klima und Diagenese, die das Gestein entscheidend mitprägen, war nur schwer vorzunehmen. Aus Vergleichen, Beobachtungen und theoretischen Überlegungen konnten Abhängigkeiten der einzelnen Faktoren untereinander und ihr Anteil an der Porenbildung abgeschätzt werden, wobei die zeitliche Abfolge der Prozesse nur in wenigen Fällen nachzuweisen war.

Die Korngröße liegt im Sandbereich, wobei im Untersuchungsgebiet eine zunehmende Differenzierung des Sediments von NW nach SO zu beobachten ist. In derselben Richtung nimmt auch der Kiesgehalt zu.

Die Korngröße nimmt direkt Einfluß auf die Porosität, indem bei kleineren Körnern durch Vergrößerung der Oberfläche die Kristallisationskeime vermehrt sind und durch stärkere Zementation mehr Porenraum gefüllt wird.

Längliche Quarz- und Feldspatkörner zeigen keine bevorzugte Einregelungsrichtung.

Hinsichtlich der Kornrundung konnten keine Unterschiede bei den einzelnen Proben festgestellt werden.

Die Porosität zeigt kaum Abhängigkeit vom Ungleichförmigkeitsgrad, da dieser nur zwischen 1,9 und 3,0 schwankt.

Durch Transportauslese sind die Quarzkörner in den gröberen und die Feldspäte in den feinkörnigeren Lagen angereichert. Dies wirkt sich bei der Porenbildung während der Diagenese deutlich aus.

Mit Hilfe verschiedener optischer Methoden (Polarisationsmikroskop, Rasterelektronenmikroskop, Image Analyzer) konnten Erkenntnisse über Form, Verteilung und Entstehung der Poren gewonnen werden.

Nach Größe und Entstehung werden Makroporen und Mikroporen unterschieden, wobei letztere noch aufgegliedert werden können in Lösungsporen, Zwickelporen und Poren in der Intergranularsubstanz.

Durch Untersuchung mit dem Image Analyzer wurde nachgewiesen, daß die Poren nicht an eine Feinschichtung (im cm-Bereich) gebunden sind.

Während durch die oben genannten Beobachtungen die Poren mehr qualitativ erfaßt wurden, sind zur Bestimmung von Porosität und Permeabilität präzise physikalische Meßverfahren angewandt worden.

Die Porosität wurde auf drei verschiedene Arten bestimmt. Mit Hilfe des Luftpyknometers und der Wassersättigung wurde die effektive Porosität erfaßt. Diese Ergebnisse stimmen mit geringen Abweichungen mit den Werten der absoluten Porosität überein, die über das Volumen und das spezifische Gewicht des Gesteins ermittelt wurden.

An einigen Proben erfolgte eine quantitative Bestimmung der Porenradien und ihrer Verteilung mit der Quecksilberporosimetrie, wobei der Einfluß der Gesteinsrauigkeit aufgezeigt und eliminiert werden konnte. Dabei ergab sich ein mittlerer Porenradius von ca. 10  $\mu\text{m}$ .

Um exakte Vergleichswerte über das Permeabilitätsverhalten der Gesteine zu ermitteln, wurde an 92 Proben durch mehr als tausend Einzelmessungen die absolute Permeabilität bestimmt. Diese Anzahl der Messungen war nötig, um durch ein geeignetes graphisches Verfahren die Störfaktoren wie apparativen Fehler, KLINKENBERG-Effekt, Turbulenz und Kompressibilität der Luft auszuschalten. Die Permeabilitäten bei den untersuchten Gesteinen schwanken zwischen 0,1 und 4000 md.

Durch diese Messungen konnte an den orientiert entnommenen Proben (je eine Probe senkrecht und parallel zur Schichtung) ein anisotropes Permeabilitätsverhalten festgestellt werden.

Die Permeabilität für Wasser, die von der absoluten Permeabilität abweicht, wurde ebenfalls gemessen, und der Zusammenhang der beiden Werte dargestellt.

Die Druckabhängigkeit und das stärkere Abnehmen der Permeabilität für Wasser im Vergleich zur Permeabilität für Luft bei kleiner werdenden Poren beweisen die Wechselwirkungen von Wasser und Gestein. Daraus ergaben sich Anhaltspunkte für das Fließen des Wassers im Boden und die Bestimmung eines wirksamen Porenradius.

## Lage der Probenentnahmepunkte

### Grenzkarniolhorizont

|                |   |        |   |        |
|----------------|---|--------|---|--------|
| Reig           | r | 444810 | h | 557045 |
| Friedrichsburg | r | 445180 | h | 556485 |
| Gehülz         | r | 444945 | h | 556803 |
| Kronach        | r | 445140 | h | 556885 |
| Weissenbrunn   | r | 445440 | h | 556220 |
| Kulmbach       | r | 446280 | h | 555345 |
| Waizendorf     | r | 446595 | h | 554990 |
| Trebgast       | r | 446775 | h | 554705 |
| Mürsbach I     | r | 441921 | h | 554738 |
| Mürsbach III   | r | 441811 | h | 555093 |

### Keupersandsteine

|                 |   |        |   |        |
|-----------------|---|--------|---|--------|
| Gollmuthshausen | r | 360149 | h | 558197 |
| Molkenbrunnen   | r | 360319 | h | 556579 |
| Großseibstadt   | r | 360124 | h | 557500 |
| Happertshausen  | r | 360509 | h | 555892 |
| Oberlauringen   | r | 355821 | h | 556629 |
| Sulzfeld        | r | 360112 | h | 556908 |
| Sulzfeld        | r | 360174 | h | 556969 |
| Wülfershausen   | r | 359590 | h | 557825 |

### Mittlerer Buntsandstein

|                  |   |        |   |        |
|------------------|---|--------|---|--------|
| Ostheim          | r | 358640 | h | 558930 |
| Burgwallbach     | r | 358015 | h | 558030 |
| Oberweissenbrunn | r | 356952 | h | 558632 |
| Völkershausen    | r | 358960 | h | 559475 |
| Lebenhan         | r | 358300 | h | 558110 |
| Rödles           | r | 358087 | h | 558100 |

## Literaturverzeichnis

ABASSOW, M.T., WESIROW, D.S. KALANTAROW, A.I., TAIROW, N.D.:

Experimentelle Untersuchungen der Gasabgabe von Schichten.-  
Z. angew. Geol. 19, S. 305-307, Berlin 1973

BEAR, J.:

Dynamics of fluids in porous media.-  
763 S. New York (Elsevier) 1972

BILZ, P., MORENZ, A.:

Ermittlung des Grades der Inhomogenität von Körnungs-  
bändern mit Hilfe des Kleinrechners Cellatron SER 2c.-  
Z. angew. Geol. 18, S. 167-171, Berlin 1972

BITTERSÖHL, J.:

Die hydrogeologischen und hydrochemischen Beziehungen  
zwischen Grundwasser und Speichergestein unter Berück-  
sichtigung der Versickerungszone (Rhön-Haßberge).-  
Diss. TU München (in Vorbereitung)

BRADSHAW, P.M.D.:

Measurement of the modal composition of a granitic rock  
powder by point-counting, infra-red spectroscopy and X-ray  
diffraction.-  
Min.Mag. 36, S. 94-100, 1967

BURJAKOWSKIJ, L.-A.:

Permeabilitätsbestimmung mit Hilfe der Widerstandskarottage.-  
Z. angew. Geol. 6, S. 112-114, Berlin 1960

BUSCH, K.-F., LUCKNER, L.:

Geohydraulik.- 442 S., Stuttgart (Enke) 1974

CRAMER, P.:

Unveröff. Niederschrift über die Buntsandsteinexkursion  
vom 6.-9.7.1971.- 8 S., München 1971

CHABAKOW, A.E. in RUCHLIN, L.B.:

Grundzüge der Lithologie.- 806 S. Berlin (Akademie Verlag) 1958

CHALKLEY H.W., CORNFIELD J., Park, H.:

A Method for Estimating Volume-Surface Ratios.-  
Science 110, S. 295-297, 1949

CHARDABELLAS, P.-E.:

Durchflußwiderstände im Sand und ihre Abhängigkeit von  
Flüssigkeits- und Bodenkennziffern.-

Diss. 50 S, Techn. Hochschule Berlin, 1940

DACHLER, R.:

Grundwasserströmung.-

Wien (Springer) 1936

DIECKMANN, E. PETZOLD. H.:

Sandprobleme bei der Aquifler-Speicherung.-

Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie, S. 181-187, 20,  
Hamburg 1967

DÜRBAUM, H.J.:

Über das Darcysche Gesetz.-

Bericht über die Tagung der Internationalen Assoziation  
für Hydrologie in Dijon 1956

Der Durchlässigkeitsbeiwert von Lockergesteinen und seine  
Bestimmung.-

In A.BENTZ und H.J.MARTINI Lehrbuch der angew. Geol.  
Bd II, Teil 2, S. 1474-1515, Stuttgart (Enke) 1969

Porosität und Durchlässigkeit von Gesteinen.-

In A.BENTZ und H.J.MARTINI Lehrbuch der angew. Geol.  
Bd II, Teil 1, S. 934-949, Stuttgart (Enke) 1968

Zur Bestimmung der Transmissivität von Lockergesteins-  
Grundwasserleitern aus Pumpversuchen.-

International Association of Hydrologist Mommoires

Vol. F. Congress of Hannover 1965, S. 65-68, Hannover 1967

DURBAUM, H.J. und andere

Untersuchungen der Gesteins-und Gebirgsdurchlässigkeit  
des Buntsandsteins in Nordhessen.-

Notizbl. des hess. Landesamtes für Bodenf. 92, S. 258-274  
Wiesbaden 1969

FÜCHTBAUER, H., MÜLLER, G.:

Sedimente und Sedimentgesteine.-

Sediment-Petrologie Teil II, 726 S. Stuttgart

(Schweizerbart) 1970

GAWLIK, J.:

Geologie des Vorlandes der fränkischen Linie zwischen  
Goldkronach und Neuenmarkt.-

Erlanger geol. Abh. 18, 19 S. Erlangen 1955

GREENMAN, N. N.:

On the Bias of Grain-Size Measurements made in  
Thin-Section: A Discussion.-

J. of Geology 59, S. 268-274, Chicago 1951

GRIFFITHS, J.C.:

Estimation of Error in Grain Size Analysis.-

J. of Sedimentary Petrologie 23, S. 75-84, Tulsa, Oklahoma 1953

GUDDEN, H.:

Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25000  
Blatt 5834 Kulmbach.-

154 S. Bayer. Geol. Landesamt München 1955

HAGENDORF, U., MILDE, G., TETZLAFF, U.:

Methodische Grundlagen und praktische Anwendungen von  
Rekonstruktionsversuchen hydrogeologischer Parameter bei  
paläohydrogeologischen Untersuchungen.-

Z. angew. Geol. 19, S. 307-313, Berlin 1973

HAMEISTER, E.:

Wie wird die absolute Permeabilität von Gesteinen ermittelt?.-  
Z. angew. Geol. 6, S. 114-117, Berlin 1960

Mikrohydraulik der absoluten Durchlässigkeit in Erdöl-  
und Erdgasspeichergesteinen.-

Z. angew. Geol. 5, S. 577-582, Berlin 1959

HAUTHAL, U.:

Zum Wasserleitvermögen von Gesteinen des Mittleren Buntsandsteins.-

Z. angew. Geol. 13, S. 405-406, Berlin 1967

HEITTELE, H.:

Versickerungsvorgänge in der Buntsandsteinzone des südlichen Saarlandes.-

Diss. Univ. Tübingen 1968

HERMANN, A.:

Epirogene Bewegungen im germanischen Buntsandsteinbecken und deren Bedeutung für lithostratigraphische Parallelisierungen zwischen Nord- und Süddeutschland.-

Geol. Jb. 81, S. 11-72, Hannover 1962

HERMANN, A., HOFRICHTER, E.:

Die Hardeggen-Folge (Abfolgen 1-4) des Mittleren Buntsandsteins in der nördlichen Hessischen Senke.-

Geol. Jb. 80, S. 561-652, Hannover 1963

HORN, D.:

Diagenese und Porosität des Dogger-beta-Hauptsandsteins in den Ölfeldern von Plön-Ost und Preetz.-

Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie 18, S. 249-255, Hamburg 1965

JAENS, H.:

Die statistische Auswertung von Porositäts- und Permeabilitätsmessungen.-

Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie 14, S. 93-100, Hamburg 1961

JÜNTGEN, H., SCHWUGER, M.:

Aussagekraft der Quecksilber-Porosimetrie bei der Charakterisierung poröser Stoffe.-

Chemie-Ingenieur-Technik 38, S. 1271-1278, 1966

JUNGWIRTH, J.:

Zur Stratigraphie und Fazies des Unteren und Mittleren Buntsandsteins in Südthüringen (Wasungen-Sonneberg).-

Beih. Z. Geol. 18, Beih. 66, Berlin 1969

KAISER, E.:

Die Diamantenwäse Südwestafrikas.-  
Bd II, 533 S., Berlin (Reimer) 1926

KAUTZSCH, E.:

Der Einfluß der Böhmisches Masse auf die Entwicklung  
des Buntsandsteins an ihrem Nordweststrand.-  
Neues Jb. Min.und G<sub>e</sub>ol., Beil.-Bd. 70, Abt. B  
S. 29-92, 1933

KLINKENBERG, L.J.:

The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases.-  
Drill. and Prod. Pract., API, S. 200-213, New York 1941

KLUG, H.P., ALEXANDER, L.E.:

X-Ray Diffraction Procedures.-  
716 S, London (John Wiley) 1954

KLOTZ, D.:

Hydraulische Eigenschaften der Kiesbelagfilter.-  
Bohrtechnik, Brunnenbau, Rohrleitungsbau 22,  
S. 323-328, Köln 1971

KNIESEL, J.:

Über das Abgabevermögen der Grundwasserleiter des  
Mittleren Buntsandsteins in Thüringen.-  
Z. angew. Geol. 15, S. 25-28, Berlin 1969

KÜHN, H.:

Möglichkeiten zur Untersuchung der Mikrohydraulik des  
Grundwassers.-  
Beitr. Ber. Naturh. Ges. 5 (Keller-Festschrift) Hannover 1968

KUTILEK, M.:

Non-Darcian flow of water in soils-laminar region.-  
Development in soil science Bd. 2 (Fundamentals of trans-  
port phenomena in porous media), S. 327-339  
Amsterdam (Elsevier), 1972

LEITZ, F.:

Lithostratigraphie des Zechsteins und Buntsandsteins bei  
Coburg-Kronach (Nordost-Bayern).-

Diss. Bochum 1975

LEPPER, J.:

Neue Ergebnisse lithostratigraphisch-fazieller Detail-  
untersuchungen im Grenzbereich Mittlerer/Oberer Bunt-  
sandstein zwischen Fulda und Neckar.-

Diss.Univ.Würzburg, 189 S., Würzburg 1970

LUDEWIG, M.:

Untersuchungen über die Gültigkeitsgrenzen des Darcyschen-  
Gesetzes bei Sanden und Kiesen.-

Wiss. Z. Hochschule f.Bauwesen Leipzig 3, S. 151-164, 1967

MAROTZ, G.:

Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natür-  
lichen Untergrund.-

Mitt. Inst. Wasserwirtschaft, Grundbau und Wasserbau der  
Univ. Stuttgart, Heft 9, Stuttgart 1968

MARSAL, D.:

Statistische Methoden für Erdwissenschaftler.-

152 S., Stuttgart (Schweizerbart) 1967

MEDER, H.:

Über die Berechnung der Durchlässigkeit von Sandsteinen  
aus Porosität und Korngrößenverteilung.-

Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie 19, S. 626-634,  
Hamburg 1966

MEINCKE, W.:

Hydrodynamik im Solling-Sandstein (Mittlerer Buntsand-  
stein) des Thüringer Beckens.-

Z. angew. Geol. 13, S. 399-405, Berlin 1967

MÖLLER, H.-W.:

Zur Ermittlung der Durchlässigkeit von Lockersedimenten  
durch Laborversuche und Versickerung im Gelände.-  
Diss. Freie Univ.Berlin, 49 S., Berlin 1972

MÜLLER, W., RENGGER, M., BENECKE, P.:

Bodenphysikalische Kennwerte wichtiger Böden, Erfassungs-  
methodik, Klasseneinteilung und kartographische Darstellung.-  
Beih. geol.Jb.Bodenkundliche Beitr. 99, S. 13-70, Hannover 1970

MÜLLER, G.:

Methoden der Sedimentuntersuchung.-  
Sediment-Petrologie Teil 1, 303 S. Stuttgart (Schweizerbart)  
1964

NEEF, H.:

Grundlagen und Anwendung der Röntgenfeinstrukturanalyse.-  
404 S., München (Oldenbourg)1959

PETRIJOHN, F.J.:

Sedimentary Rocks.-  
526 S., New York (Harper) 1948

PURCELL, W.R.:

Capillary Pressures-Their Measurement Using Mercury and the  
Calculation of Permeability Therefrom.-  
Petroleum Transactions, AIME 186, S. 36-48, Huston 1949

REUL, K.:

Geologie des Kartenblattes Thurnau (5934), 1:25000.-  
Erlanger geol. Abh. 6, S. 3-70; Erlangen 1953

RICHTER, L.:

Zur Bestimmung der Absenkreichweite bei Grundwasser-  
fassungsanlagen.-  
Z. angew. Geol. 13, S. 407-415, Berlin 1967

RIECKMANN, M.:

Untersuchungen von Turbulenzerscheinungen beim  
Fließen von Gasen durch Speichergesteine unter  
Berücksichtigung der Gleitströmung.-

Erdöl-Erdgas-Z. 86, S. 36-51, Wien 1970

Zur Bewertung von Speichergesteinen geringer Per-  
meabilität.-

Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie, 16, S. 488-496  
Hamburg 1963

RIECKMANN, M., BECKER, J.:

Messung gesteinsphysikalischer Parameter an Spülproben.-  
Sonderdruck aus Erdölzeitschrift H.11, 11 S., Wien 1962

RÜHL, W., SCHMID, C.:

Über das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen  
absoluten Permeabilität von Sandsteinen.-

Geol. Jb. 74, S. 447-462, Hannover 1957

RÜHL, W., SCHMID, C., WISSMANN, W.:

Verdrängungsversuche an porösen Gesteinsproben unter  
Lagerstättenbedingungen.-

Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie, 16, S. 504-511,  
Hamburg 1963

SCHMID, C.:

Über effektive und relative Durchlässigkeit poröser  
Ölspeichergesteine.-

Erdöl und Kohle, Erdgas, Petrochemie, 2, S. 73-76,  
Hamburg 1956

SCHMIDT, I.:

Beitrag zur Bestimmung der Durchlässigkeit nach Darcy  
für schluffige Sandböden mit Hilfe von Kenngrößen des  
Kornhaufwerkes.-

Mitt. Inst. f. Wasserbau TU Braunschweig, 90 S.  
Braunschweig 1971

SCHMITT, P.:

Hydrogeologische u. hydrochemische Verhältnisse des  
Grabfeldes und seiner Umgebung.-  
Diss. TU München in Vorbereitung

SCHNITZER, W.A.:

Die Quarzkornfarbe als Hilfsmittel für die stratigraphi-  
sche und paläogeographische Erforschung sandiger Sedimente.-  
Erlanger geol. Abh. 23, S. 1-13, Erlangen 1957

Die Lithologie und Paläogeographie des Buntsandsteins  
am Westrand der Böhmisches Masse.-  
Erlanger geol. Abh. 24, S. 1-130, Erlangen 1957

SCHRÖDER, L.:

Zur Sedimentologie des Mittleren Buntsandsteins.-  
Geol. Jb. 82, S. 655-704, Hannover 1965

SCHULTZE & MUHS.:

Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten.-  
722 S., Berlin (Springer) 1967

SCHREIBER, S.:

Faziesverhältnisse des Buntsandsteins und Keupers bei  
Kronach.-  
Erlanger geol. Abh. 22, S. 3-70, Erlangen 1956

SINGHAL, A.K., SOMERTON, W.H.:

Two-Phase Flow Through a Non-Circular Capillary at  
Low Reynolds Numbers.-  
J. of Canadian Petroleum Technology, 9, Number 3,  
S. 179-205, Montreal 1970

SLEPICKA, F.:

Filtracní zákony.-  
Mitt. d. Wasserwirtschaftlichen Forsch.Inst. Prag-podbaba,  
110 S., Prag 1961

SNARSKY, A.N.:

Geologische und physikalische Grundlagen der Erdöl-  
und Erdgas-Speichergesteine.-

184 S., Bergakademie Freiberg 1963

STEINLEIN, H.:

Der Buntsandstein am Westrand der Böhmisches Masse.-

Erlanger geol. Abh. 8, S. 3-94, Erlangen 1953

TIETZE, K.:

Suggested Method for the Determination of Permeability.-

Vorschlag für eine Standardisierung von Permeabilitäts-  
apparaturen, 13 S., Hannover (Bundesanstalt f. Boden-

forschung) Nov. 1973

TRUSHEIM, A.:

Zur Gliederung des Buntsandsteins.-

Erdöl-Z. H. 7, 17 S., Wien 1963

UDLUFT, P.:

Hydrogeologie und Hydrochemie der Südrhön unter beson-  
derer Berücksichtigung der Mineralquellen im Brücken-  
auer Raum.-

132 S., Diss. Techn. Hochschule München 1969

VADGAMA, U.:

Untersuchungen über die Benetzbarkeit künstlich herge-  
stellter porengeometrisch homogener poröser Medien.-

Erdöl-Erdgas-Z. 86, S. 470-488, Wien 1970

VALENTIN, F.:

Nicht-lineares Widerstandsverhalten poröser Medien.-

Mitt. d. Inst. f. Hydraulik und Gewässerkunde TU München,  
H. 6, 66 S., München 1970

WALGER, E.:

Die Korngrößenverteilung von Einzellagen sandiger  
Sedimente und ihre genetische Bedeutung.-

Geol. Rdsch. 51, S. 494-507, Stuttgart 1961

Zur Darstellung von Korngrößenverteilungen.-

Geol. Rdsch., 54, S. 976-1002, Stuttgart 1965

YOUNGER, J.S., LIM, C.I.:

An Investigation into the behaviour through compacted  
saturated fine-grained soils with regard to fines con-  
tent and over a range of applied hydraulic gradients.-  
Development in soil science Bd. 2 (Fundamentals of  
transport phenomena in porous media) S. 312-324  
(Elsevier) Amsterdam 1972

ZAGAR, L.:

Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit  
von feuerfesten Baustoffen.-

Arch. f. Eisenhüttenwesen, 26, S. 561-562, 1955

## Tafel I

- Abb. 1 Bildung von idiomorphen Quarzen und gelförmigen Aufwachsungen (Mürsbach I, Teufe 641,8 m). Bildbreite 190  $\mu\text{m}$ .
- Abb. 2 Eine Gesteinspore wächst mit Karbonatkristallen zu (Kulmbach). Bildbreite 80  $\mu\text{m}$ .
- Abb. 3 Poren zwischen Aufwachsungen (Mürsbach I, Teufe 641,3 m). Bildbreite 450  $\mu\text{m}$ .
- Abb. 4 Mikroporen durch Zersetzung von Kristallen entstanden (Kulmbach). Bildbreite 20  $\mu\text{m}$ .

## Tafel II

- Abb. 1 Nebeneinander von Kristallneubildung, Zersetzung und Aufwachsung (Mürsbach I, Teufe 641,8 m). Bildbreite 500  $\mu\text{m}$ .
- Abb. 2 Beginnende Zerstörung eines Feldspates bevorzugt nach seiner Spaltbarkeit (Mürsbach I, Teufe 641,8 m). Bildbreite 190  $\mu\text{m}$ .
- Abb. 3 Durch einen dünnen Überzug werden einzelne kleine Körner mit eingeschlossen und die Kristallform abgerundet (Gehülz). Bildbreite 20  $\mu\text{m}$ .
- Abb. 4 Gesteinspore, daneben Aufwachsungen von verschiedener Form (Kulmbach). Bildbreite 450  $\mu\text{m}$ .

Tafel I

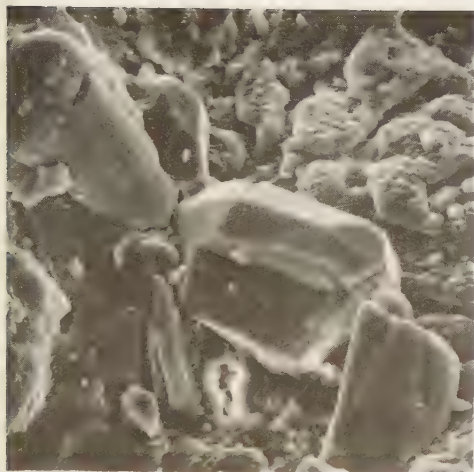


Abb. 1



Abb. 2



Abb. 3



Abb. 4

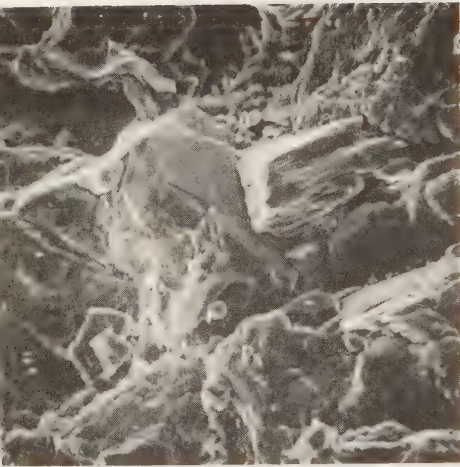


Abb. 1

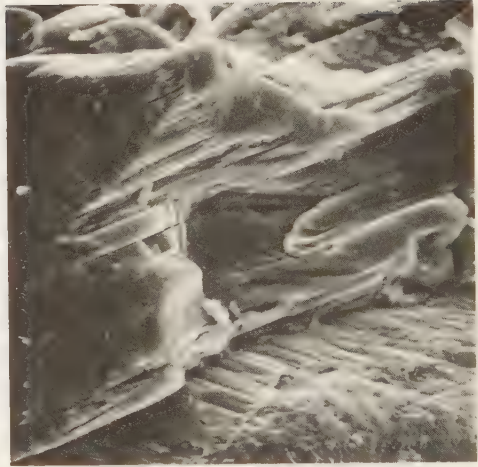


Abb. 2



Abb. 3

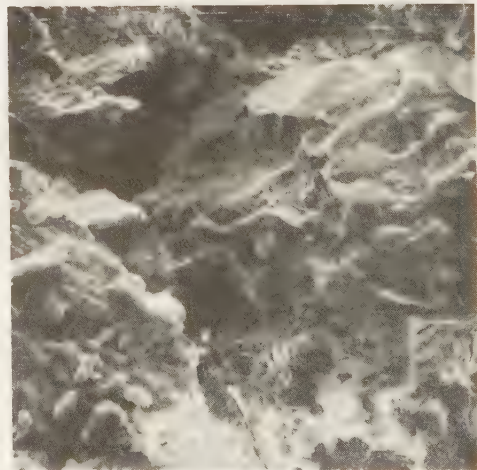


Abb. 4

## Lebenslauf

Am 17. September 1942 wurde ich in Eger als erstes Kind von Albert Dobner und seiner Frau Wanda, geb. Stowasser geboren.

Nach der Vertreibung kam ich mit meinen Eltern nach Rohr in Niederbayern. Hier besuchte ich die Volksschule und trat anschließend in das dortige humanistische Gymnasium St. Nepomuk über. Nach dem Abitur im Sommer 1964 begann ich im Wintersemester 1964/65 das Geologiestudium an der Universität München. Im Mai 1968 legte ich die Diplom-Vorprüfung und im Juli 1971 die Diplom-Hauptprüfung ab. Im Mai 1972 begann ich mit meiner Dissertation. Seit dem 1. September 1974 bin ich wissenschaftlicher Angestellter beim Bayerischen Geologischen Landesamt.









